

УДК-621.371

ОЦЕНКА ИНТЕГРАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МОДЕЛИ ИОНОСФЕРЫ

В.А. Голыгин, Е.М. Вдовин, К.С. Паламарчук, В.И. Сажин

ESTIMATION OF INTEGRAL ABILITIES OF THE IONOSPHERE MODEL

V.A. Golygin, E.M. Vdovin, K.S. Palamarchuk, V.I. Sazhin

Актуальность описания высотной зависимости электронной концентрации для конкретного пункта земной поверхности в отдельный момент времени возрастает в связи с активным развитием GPS-мониторинга верхней атмосферы Земли. Одним из возможных путей получения такого описания может быть коррекция среднемесячных моделей ионосферы на текущую ситуацию по оперативно получаемой информации. В докладе оценивается возможность адаптации полуэмпирической модели ИГУ (с развитием на область высот выше максимума) по текущим данным об ее основных параметрах с точки зрения отражения моделью значений полного электронного содержания (ПЭС). Приведены данные численного моделирования по исследованию связи вариаций параметров модели с вариациями значений ПЭС, на основании чего выявлено определяющее значение исследования вариаций отдельного параметра модели – критической частоты. Установлены значения коэффициента корреляции между временными изменениями этого параметра, определяемого из данных ВЗ, и величиной ПЭС, вычисляемой по данным приемников сигналов GPS, размещаемым в сети Интернет. Приведены оценки эффективности рассматриваемой методики адаптации модели.

Topicality of description of height dependence of electronic concentration for a certain point of the Earth surface at separate time moment is increasing in view of active development of GPS monitoring of the Earth upper atmosphere. One of the possible ways to obtain this description is to correct the monthly average ionosphere models according to current situation based on on-the-fly information. In the report we appreciate possibility of adaptation of ISU semiempirical model (with development for more than maximum height level), according to current data of its main parameters, from point of how the model corresponds to values of total electronic content (TEC).

Here the data are described of computational modeling on investigation of correlation of model parameters' variations with variations of TEC values. Based on previous research the deciding influence has been found of a certain model parameter – critical frequency. Values of correlation coefficient has been determined between time changes of this parameter which is determined from vertical probe data and TEC value which is calculated from the Internet published data produced by GPS signal receivers. Also evaluations of efficiency of concerned method of model adaptation is described.

Под интегральными возможностями модели ионосферы в данной работе понимается способность адекватно отражать величину и вариации полного электронного содержания (ПЭС), определяемого в расчетах как интеграл по высоте h от электронной концентрации N . Актуальность описания вариаций ПЭС возрастает в связи с активным развитием спутниковых навигационных систем (СНС), в которых величина ПЭС определяет так называемую ионосферную поправку в рассчитываемые значения координат.

Определение значений ПЭС может быть выполнено при использовании довольно дорогостоящих двухчастотных приемников сигналов СНС. Высокая цена затрудняет использование таких приемников в широком масштабе. Вместе с тем, развита система реконструкции значений ПЭС на основе данных опорной сети таких приемников, расположенных в различных точках земной поверхности. Полученные значения размещаются в виде карт в глобальной сети ИНТЕРНЕТ, в частности, на сайте NASA [1] с временным сдвигом порядка суток. Ошибка восстановления ПЭС в произвольной точке оценивается в [2] на уровне от 5 до 15 % и зависит от ряда факторов.

Ионосферные модели по своему построению, как правило, предназначены для описания среднемесячной ситуации поэтому неудовлетворительно отражают текущие значения ПЭС. Вместе с тем, разрабатываются способы адаптации среднемесячных моделей к конкретным условиям посредством коррекции по оперативно получаемой информации о состоянии ионосферы.

В настоящей работе рассматривается возможность подобной коррекции моделей с точки зрения отражения текущих значений ПЭС в отдельных точках земной поверхности. В качестве исходной взята полуэмпирическая модель ионосферы (ПЭМИ) ИГУ [3], дополненная с учетом изменений N на участке выше максимума вплоть до верхней границы ионосферы [4]. По способу построения модель может быть удобно использовать без каких-либо модификаций в режиме коррекции.

Выше максимума изменение электронной концентрации N с высотой в модели описывается сопрягаемыми параболической и экспоненциальной зависимостями. Получение точки сопряжения и значение N в ней определяется однозначно исходя из основного варианта ПЭМИ. Дальнейшее уменьшение N с высотой описывается экспонентой, в показателе которой разность текущей высоты h и высоты верхней границы ионосферы $h_{\text{тр}}$ отнесена к приведенной шкале высот H . Для изменения последней принята линейная зависимость, наклон которой определяется значениями $H1$ и $H2$ на начальном и конечном участках. Для $h_{\text{тр}}$, согласно литературным данным [5], выбрано значение 2000 км. Что касается величин $H1$ и $H2$, то их выбор был осуществлен с позиции более точного описания моделью значений ПЭС. По данным [1] были вычислены среднемесячные значения ПЭС для отдельных часов различных гелиофизических условий нескольких пунктов средних широт. Далее было выполнено численное моделирование вариаций ПЭС в зависимости от значений параметров $H1$ и $H2$. При этом было установлено, что изменение параметра $H2$ в значительно

меньшей степени, чем изменение $H1$ влияет на величину ПЭС, рассчитываемую по модели. Поэтому для $H2$ закреплено определенное значение, среднее для типичных значений в различных условиях [5]. После этого различия между значениями ПЭС из модели и определяемыми из измерений снижались до погрешности измерений подбором значения оставшегося свободного параметра аппроксимации $H1$. Для него были подобраны значения, обеспечивающие выделенным классам гелиофизических условий удовлетворительное совпадение модельных и среднемесячных измеренных значений ПЭС.

Для разработки способа коррекции модели на текущую ситуацию вначале посредством численного моделирования была исследована степень влияния вариаций того или иного из основных параметров модели на величину ПЭС, рассчитываемую по ней. Рассмотрены вариации критической частоты и высоты максимума, а также параметра $H1$, изменение которого наибольшим образом влияет на величину вклада в ПЭС верхнего участка профиля $N(h)$ от высот порядка 500 км (верхняя граница области F2) до окончания ионосферы. Диапазоны вариаций указанных параметров модели выбраны на основе известных экспериментальных данных и физических соображений. На рис. 1 показаны полученные величины изменения величины ПЭС по отношению к исходному значению в зависимости от вариаций ионосферного параметра. Как видно из рисунка, степень влияния на ПЭС вариаций f_oF2 в несколько раз больше, чем для других параметров. Таким образом, корректируя значения f_oF2 в модели, можно надеяться получить значения ПЭС, существенно более близкие регистрируемому. Для подтверждения этой возможности была исследована корреляция между изменениями значений ПЭС и f_oF2 . При этом из рассмотрения исключались моменты времени, характеризующиеся возмущенностью магнитного поля Земли. Известно [2], что для таких моментов в работе аппаратуры навигационных систем возможны существенные погрешности. Отбор таких моментов проводился по данным о K -индексе, публикуемым на сайте магнитной обсерватории ИСЗФ [6]. Был исследован трехмесячный массив ежечасных значений ПЭС для пункта Иркутск за 2002 г. Моменты времени с $K > 4$ исключались из рассмотрения. Значения f_oF2 были получены на станции ИСЗФ Иркутска [7]. В методике оценки корреляции изменений f_oF2 была также учтена информация,

характеризующая относительную точность определения ПЭС в измерениях, – приводимые значения параметра, называемые RMS. Анализ временного изменения этого параметра показал, что на фоне обычно небольших изменений его величины наблюдаются периоды, когда значения RMS существенно возрастают. В методике периоды, для которых величина RMS выростала в 1.5 раза по сравнению со средним значением, характеризующим стабильный уровень, исключались. На рис. 2 для примера показаны месячные изменения в отдельный час (март 2002 г.) ПЭС и RMS с наличием периода значений RMS, превышающих выбранный порог.

После такого предварительного отбора были проанализированы суточные изменения ПЭС и f_oF2 для ряда дней этого периода и месячный ход для некоторых часов. Надо отметить, что исследование корреляции указанных величин затрудняет довольно значительная величина погрешности определения ПЭС (см. выше) и f_oF2 (~5–7%). В периоды небольших изменений f_oF2 , например, в середине дня или ночи, такие ошибки вполне могли приводить к существенному значению коэффициента корреляции r . В целом, можно заключить, что в большинстве случаев имеется определенная корреляция временного изменения указанных величин (r имеет значения ≥ 6). В то же время в отдельных случаях (их доля составляет при данном анализе порядка 20%), когда корреляция отсутствует, значение r находится в пределах от 0.2 до 0.5. Надо полагать, что в этих случаях на высотах верхней части ионосферы заметную роль при изменении N играют физические процессы, динамика которых слабо коррелирует или вообще не коррелирует с изменением факторов, определяющих поведение электронной концентрации на высотах области F2, достаточно адекватно отражаемое вариациями параметра f_oF2 .

Для оценки эффективности коррекции было выполнено моделирование значений ПЭС по модели в среднемесячном и скорректированном варианте для нескольких десятков моментов времени указанного периода пункта Иркутск. В таблице представлены примеры результатов, полученных для отдельных моментов. Можно видеть, что, во-первых, исходная модель достаточно удовлетворительно описывает диапазон изменений ПЭС в конкретные часы периода. Так, относительное среднее расхождение значений ПЭС по модели и значений определяемых из карт, составило по всему обработанному массиву примерно 30%. Во-вторых, как видно из таблицы, во всех случаях корреляция значений f_oF2 в модели позволяет снизить расхождения между вычисленными по модели

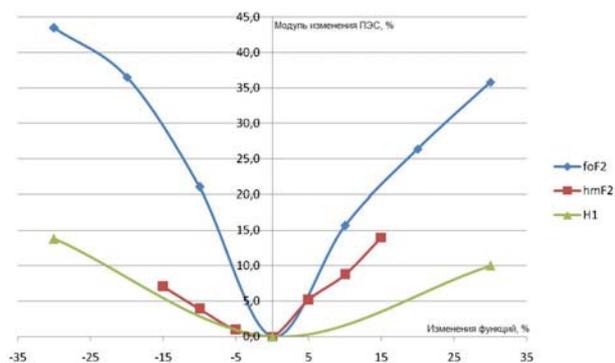


Рис. 1. Оценка степени вариаций ПЭС при изменениях параметров модели.

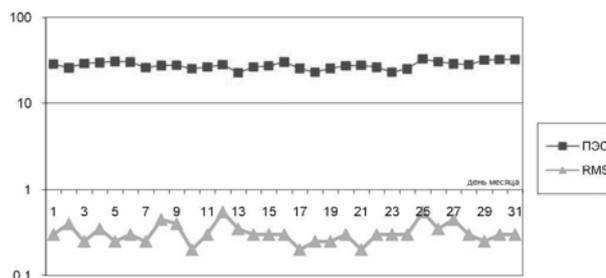


Рис. 2. Пример анализа изменений параметра RMS.

Примеры эффективности коррекции в отдельные моменты времени

Дата 2002 г.	Время, UT	ПЭС (исх. мод.), TECU	ПЭС (скорр. мод.), TECU	ПЭС (Ionex), TECU	расхождение для исх. мод., %	расхождение для скорр. мод., %
10.03.	14	25.0	37.0	32.8	23.8	12.8
12.03.	22	11.3	18.5	22.0	48.6	15.9
02.07.	10	36.2	32.9	27.0	34.1	21.9
05.07.	10	35.8	28.0	31.0	15.5	9.7
10.07.	18	18.6	20.1	19.5	4.6	3.1
25.07.	18	18.3	20.6	20.0	8.5	3.0
01.10.	18	10.2	11.8	14.4	29.2	18.1
17.10.	18	9.2	17.4	14.5	36.6	20.0
17.10.	22	7.6	11.5	13.7	44.5	16.1
24.10.	22	7.4	13.5	14.2	47.9	4.9

и измеряемыми значениями ПЭС. Это наблюдается и в подавляющем большинстве других моментов времени приведены в таблице.

Другое дело, что не всегда такое снижение имеет значительную величину. Для моментов, когда начальные расхождения по нескорректированной модели невелики, незначительность снижения не существенна. Однако в ряде моментов времени, когда имеются значительные начальные расхождения (02.07, 01.10, 17.10.) после коррекции модели они уменьшаются в меньшей степени. Видимо, такие моменты могут быть отнесены к вышеупомянутой ситуации с заметным вкладом в значение ПЭС процессов верхней ионосферы, не коррелированных с изменением N в области F2. В целом, при обработке всего используемого массива моментов, для которых выполнялась коррекция, получено, что среднее значение расхождения между значениями ПЭС по уточненной модели и из данных измерений составило 10.5 %. Безусловно, полученная цифра требует уточнения путем привлечения дополнительных данных по другим гелиогеофизическим периодам и по другим среднеширотным пунктам. Тем не менее, это значение демонстрирует на наш взгляд довольно высокую эффективность подобной коррекции. Если дальнейшее уточнение этой величины существенно не увеличит ее, на этой основе может быть реализовано определение значений ПЭС в текущий момент времени для большого пространственного региона и их краткосрочное прогнозирование. Кроме того, более эффективно может быть выполнено прибли-

женное решение обратной задачи уточнения значения по текущим значениям f_oF2 ПЭС, возможность которого рассматривалась ранее в [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://sapp.telepac.pt/coaa/beaconsee.htm>
2. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУНЦ ВВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. 480 с.
3. Поляков В.М., Суходольская В.Е., Ивельская М.К. и др. Полуэмпирическая модель ионосферы для широкого диапазона геофизических условий. М.: МЦД-Б, 1986. 136 с.
4. Голыгин В.А., Ивельская М.К., Сажин В.И., Шутов П.П. Прогнозирование ионосферных условий для радиотрасс в глобальной сети // Байкальская международная молодежная научная школа по фундаментальной физике. Труды VII Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Иркутск, ИСЗФ СО РАН, 2004. С. 140–142.
5. Кринберг И.А., Тащилин А.В. Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 1984. 188 с.
6. <http://iszf.irk.ru/projects.php>
7. Голыгин В.А., Грозов В.П., Сажин В.И., Унучков В.Е. Региональный контроль ионосферной обстановки без организации специализированных измерений // Байкальская международная молодежная научная школа по фундаментальной физике. Труды VII Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Иркутск, ИСЗФ СО РАН, 2004. С. 70–71.

Иркутский государственный университет, Иркутск