

УДК 551.510.53

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДЕЛИ LWPC В ЗАДАЧАХ ГЕОФИЗИКИ

© 2023 г. Ю. А. Корсунская^{1,*}, С. З. Беккер¹¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия*E-mail: jukor@idg.chph.ras.ru

Радиофизическая модель LWPC предназначена для расчетов распространения радиоволн ОНЧ–НЧ диапазона в волноводном канале земля – ионосфера и является свободно распространяемой программой. По этой причине многие исследователи в области геофизики ионосферы и атмосферы используют ее как инструмент верификации создаваемых ими моделей путем сопоставления теоретических результатов с результатами натурных радиоизмерений. Однако для получения корректных выводов необходимо знать, какую точность обеспечивает LWPC и каково влияние различных параметров модели. Этой информации нет в описании программы, поэтому в данной работе сделана попытка компенсировать указанный недостаток. Анализ рассмотренных нами вариантов позволил сделать следующие выводы. Точность модели составляет ~ 0.1 – 0.5 дБ для амплитуды и 1° – 5° для фазы и зависит от трассы (координат передатчика и приемника и частоты). На эту точность программа выходит при задании ионосферы с шагом 100–150 км вдоль трассы. Замена встроенных моделей проводимости земной поверхности и магнитного поля Земли на актуальные версии не оказывает существенного влияния на результаты расчетов. Принципиальное отличие получено при замене частот соударений со стандартной экспоненциальной высотной зависимости на значения, вычисленные согласно распределению параметров нейтральной среды. В этом случае различие амплитуд достигло нескольких децибел, а фаз – нескольких десятков градусов.

Ключевые слова: геофизика ионосферы, D-слой, радиоволны, ОНЧ диапазон, верификация моделей.

Для цитирования: Корсунская Ю.А., Беккер С.З. О некоторых особенностях использования модели LWPC в задачах геофизики // Динамические процессы в геосферах. 2023. Т. 15. № 3. С. 62–72. http://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_3_62

Введение

Исследование ионосферы является одним из направлений геофизики. Радиоволны, распространяющиеся в ионосфере, модифицируются ею, поэтому анализ принимаемых радиосигналов стал наиболее важным инструментом, который позволяет мониторить состояние ионосферы. Однако сбор экспериментального материала представляет собой только часть задачи. Другой ее аспект – создание физико-математических моделей, которые позволяют объяснить наблюдаемые явления.

Создание моделей распространения радиоволн в ионосфере является отдельным научным направлением, результаты которого становятся необходимым инструментом, позволяющим проводить сравнительный анализ результатов моделирования воздействия на атмосферу различных гелиофизических и геофизических факторов с реальными измерениями.

Исследования нижней ионосферы (D-слоя и ниже) проводятся с использованием данных по распространению радиоволн низких частот (менее ~ 100 кГц). В последние годы наиболее распространенным инструментом для моделирования этого процесса является модель LWPC (Long Wavelength Propagation Capability), которая была разработана в Naval Ocean Systems Center [Ferguson, Snyder, 1980]. LWPC является основным расчетным блоком вычислительного комплекса LWPM (Long Wavelength Propagation Model), который написан на языке Fortran и находится в свободном доступе на электронном ресурсе GitHub (<https://github.com/albertoakel/lwpc>). В комплект файлов входит описание пользователя [Ferguson, 1998].

Комплекс LWPM создан для проведения конструкторских радиоинженерных разработок. Он включает в себя упрощенную модель невозмущенной ионосферы Земли для проведения расчетов в диапазоне 10–60 кГц и три модели грозových помех (шумов) в том же диапазоне, одна из которых (LNP) базируется на модели пространственно-временного распределения грозových очагов. Помимо расчетов по встроенной модели ионосферы в комплексе предусмотрена возможность задавать характеристики ионосферы табличным способом. Именно этот вариант представляет интерес для исследователей в области физики ионосферы.

Упомянутое выше описание пользователя содержит формальное описание структуры входных файлов, но не предоставляет никаких сведений о возможных ограничениях на их содержимое. В процессе использования комплекса LWPM мы, в частности, столкнулись с тем фактом, что результаты расчетов зависят от того, как распределены точки, в которых задаются высотные профили ионосферы, даже для случая, когда эти профили совпадают (то есть ионосфера меняется только по высоте). Это заставило нас более детально изучить алгоритм программы и попытаться сформулировать предварительные рекомендации по ее использованию. Результаты работы представлены в настоящей статье.

Постановка вопроса

Модель LWPC предназначена для расчетов характеристик распространения монохроматических радиоволн ОНЧ–НЧ диапазона (амплитуд и фаз) в волноводе земля – ионосфера. Обе границы волновода частично прозрачны, а сам он заполнен проводящей средой. Модель базируется на решении этой задачи для случая, когда характеристики волновода постоянны. Учет их непостоянства вдоль трассы осуществляется путем разбиения её на сегменты, внутри которых волновод считается постоянным, и дальнейшего «сшивания» решений на границах. Используемый подход базируется на одном из вариантов метода поперечных сечений [Никольский, 1977].

Нижняя стенка волновода определяется проводимостью (σ_{gr}) и диэлектрической проницаемостью (ϵ_{gr}) земной поверхности.

Характеристики верхней стенки (в том числе ее положение) и среды внутри волновода вычисляются на основе модели ионосферы как квазинейтральной холодной магнитоактивной плазмы с низкой степенью ионизации. По этой причине помимо данных о концентрациях заряженных частиц (электронов и ионов) в модель LWPC обязательно должны быть переданы данные о магнитном поле Земли и эффективные частоты соударений заряженных частиц.

Программный комплекс LWPM включает модель эффективной проводимости земной поверхности для радиоволн ОНЧ диапазона [Morgan, 1968] и модель магнитного поля Земли IGRF85 (International Geomagnetic Reference Field for 1985). Обе модели используются в расчетах в режиме «по умолчанию». В этом же режиме задаются частоты соударений в виде экспоненциальных зависимостей от высоты:

$$\nu_e = 1.816 \cdot 10^{11} \exp(-0.15h), \quad (1)$$

$$\nu_i = \nu_e / 40, \quad (2)$$

где ν_e и ν_i – частоты соударений электронов и ионов (в с^{-1}), h – высота над поверхностью Земли (в км). Частоты соударений положительных и отрицательных ионов равны.

Как сказано выше, трасса передатчик – приемник разбивается на сегменты. При использовании LWPM для расчетов по таблично заданным значениям концентраций заряженных частиц это разбиение производится по встроенному в программу алгоритму, базовая блок-схема которого приведена в описании [Ferguson, 1998].

Все перечисленные компоненты оказывают влияние на результаты работы LWPM, поэтому при использовании ее с целью верификации одних моделей необходимо иметь количественные оценки влияния других моделей на конечный результат.

За годы, прошедшие с момента создания программного комплекса, некоторые входящие в его состав модели претерпели изменения. Прежде всего, речь идет о моделях подстилающей поверхности и магнитного поля Земли.

Электрофизические характеристики поверхности Земли признаны международно значимой информацией. Их получение возложено на государства, которые контролируют соответствующую территорию, но все данные аккумулируются Сектором радиосвязи Международного союза радиосвязи (МЭС-R или ITU-R), который до 1992 года назывался – Международный консультативный комитет по радиосвязи (МККР). Эта международная структура на основе собранных данных выпускает Рекомендации (<http://www.itu.int/pub/R-REC/ru>). Для радиоволн, рассматриваемого нами диапазона, определяющей характеристикой является σ_{gr} , актуальные значения которой представлены в «Мировом атласе проводимости почвы» в виде карт [МЭС-R P.832-4, 2015]. Краткий анализ этих данных показал, что они отличаются от тех значений, которые берутся «по умолчанию» в LWPM.

Как отмечено выше, модель IGRF85 (обозначается также IGRF–4) отражает состояние магнитного поля на эпоху 1985 года. Однако магнитное поле непрерывно меняется, поэтому модель IGRF уточняется. Актуальная версия IGRF–13 позволяет получать характеристики магнитного поля Земли на любую дату в интервале 1900–2025 гг. [Alken et al., 2021]. Параметры модели получены по реальным измерениям до 2019 года. Характеристики поля на период 2020–2025 гг. вычисляются, исходя из экстраполяции. Программный код модели на языке Fortran находится в открытом доступе. Применяемый в LWPM вариант расчета частот соударений по формулам (1)–(2) является очень грубым приближением. Более строгое приведено в монографии [Гинзбург, 1967]. Из него следует, что в низкочастотном приближении частоты соударений электронов и ионов с нейтральными частицами (в с^{-1}) определяются, соответственно, по формулам

$$v_{me} = 1.5 \cdot 10^{11} \frac{N_m}{2.7 \cdot 10^{19}} \sqrt{\frac{T_e}{300}}, \quad (3)$$

$$v_{mi} = 4 \cdot 10^9 \frac{N_m}{2.7 \cdot 10^{19}} \sqrt{\frac{T_i}{300}}, \quad (4)$$

где N_m – концентрация нейтральных частиц (в см^{-3}), T_e , T_i – температуры электронов и ионов (в К), которые в D-слое обычно считаются равными между собой и температуре нейтральной составляющей. В общем случае полные частоты соударений должны учитывать соударения заряженных частиц между собой, но при низком уровне ионизации среды, что наблюдается на рассматриваемых высотах даже под действием сильных рентгеновских вспышек, этими соударениями можно пренебречь. Формулы (3)–(4) позволяют учитывать влияние изменения плотности среды и температур на частоты соударений.

Использование радиоволн в задачах геофизики требует наличия источников, сигналы которых надежно выделяются на фоне шумов естественного и антропогенного происхождения. В рассматриваемом нами диапазоне такими источниками являются мощные стационарные радиостанции, вещающие круглосуточно, или с короткими перерывами либо в определенные часы. Вещание идет в узкой частотной полосе, что в прикладном смысле позволяет рассматривать сигнал как монохроматический.

В большинстве случаев приемники размещают на стационарных объектах. Это означает, что количество радиотрасс, которые нуждаются в анализе, сравнительно невелико. При исследовании необходимо ответить на следующие вопросы:

1. Как сильно на результаты расчетов влияет шаг вдоль трассы, с которым задана ионосфера, и нельзя ли указать оптимальный диапазон значений.
2. Соответствует ли реализованный в LWPM алгоритм сегментирования трассы блок-схеме, приведенной в описании [Ferguson, 1998].
3. Каково влияние уточненной карты проводимости почвы на результаты расчетов.

4. Сколь значим учет изменения магнитного поля.
5. Какой эффект дает уточненная модель частот соударений.

Результаты тестирования

В своей работе, связанной с созданием компьютерной модели воздействия солнечного излучения на атмосферу Земли, мы используем экспериментальные данные, полученные на геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево» (ГФО Михнево, МИК) [Ryakhovskii et al., 2021] и станции A118 (<https://sidstation.loudet.org/data-en.xhtml>) проекта SID monitoring AAVSO (<https://www.aavso.org/solar-sids>) от европейских радиостанций.

Очевидно, что ответы на поставленные выше вопросы могут зависеть от высотного распределения ионизации вдоль трассы. Для генерации широкого набора вариантов таких распределений были взяты расчеты по модели [Bekker et al., 2021; 2022], которые соответствуют потокам излучения Солнца на 10.06.2014 г. в интервале 06:00–18:00 UT. Характеристики рассмотренных радиотрасс (длины и азимуты прихода сигнала в точку приема, идентификаторы и координаты приемников и передатчиков, а также частоты вещания) представлены в Таблице 1.

Таблица 1.

Характеристики радиотрасс (идентификаторы и координаты передатчиков и приемников, частоты, длины трасс и азимуты приема радиосигнала)

Передатчики	Приемники	
	МИК (54.96° С.Ш., 37.76° В.Д.)	A118 (43.46° С.Ш., 1.33° В.Д.)
GBZ (54.90° С.Ш., 3.28° З.Д.), 19.58 кГц	2582 км, 286.89°	1314 км, 346.96°
GQD (54.73° С.Ш., 2.88° З.Д.), 22.10 кГц	2563 км, 286.31°	1289 км, 347.83°
DHO (53.08° С.Ш., 7.62° В.Д.), 23.40 кГц	1963 км, 276.37°	1165 км, 21.21°
TBV (37.41° С.Ш., 27.32° В.Д.), 26.70 кГц	2104 км, 206.34°	—

Выбор временного интервала определяется тем, что в этот период поток менялся в широком интервале (см. рис. 1), но на протяжении всего периода трассы находились в области действия прямого солнечного излучения. Последнее условие вызвано ограничениями использованной модели расчета ионизации. Входные данные потоков были заданы с шагом 1 мин, что дало нам 721 вариант распределений ионизации для каждой трассы.

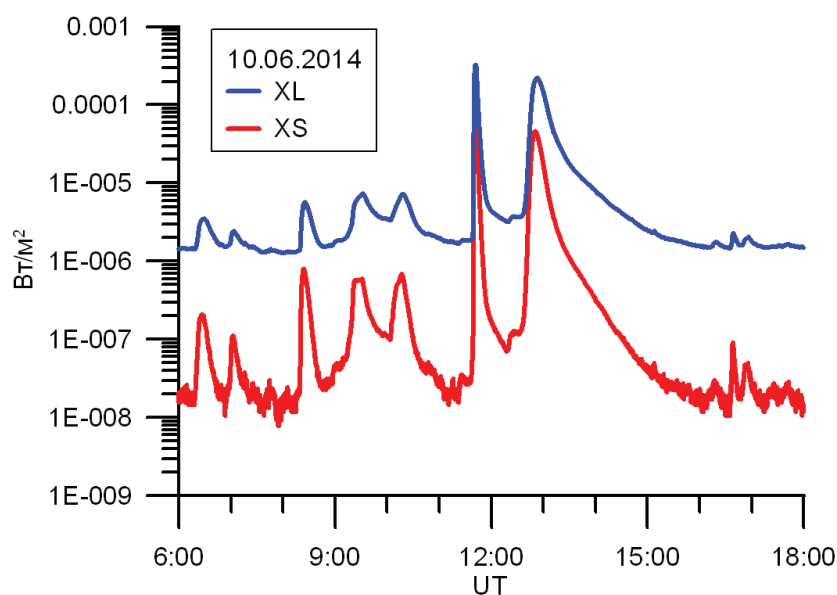


Рис. 1. Значения потоков в каналах XL (0.1–0.8 нм) и XS (0.05–0.4 нм) спутника GOES

Как сказано выше, описание LWPM не содержит явных ограничений на входные данные. В том числе это относится к величине шага вдоль трассы, с которым задаются ионосферные параметры. Однако среди приведенных в описании примеров присутствует вариант задания ионосферы в области «день – ночь» с шагом 1.8° по зенитному углу. Это означает, что авторы рассматривают как «допустимый» вариант шага 200 км даже в области наибольшего градиента ионизации. Исходя из этого, для ответа на первый из поставленных вопросов мы провели расчеты для пяти значений шага: 50, 100, 150, 200 и 250 км. Остальные параметры определялись в режиме «по умолчанию», но с учетом ионной компоненты.

Поставленная задача не предполагает сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными, а ограничена лишь сопоставлением разных вариантов между собой. Поэтому были проанализированы разности $A_{dL} - A_{150}$ и $\phi_{dL} - \phi_{150}$ амплитуд и фаз, соответственно, где нижний индекс отвечает величине шага вдоль трассы, а за «базовый» уровень взяты значения, отвечающие $dL = 150$ км. В Таблице 2 представлены минимальные и максимальные значения этих разностей, а в скобках указаны средние по абсолютной величине отклонения. Из приведенных данных видно, что все значения амплитуд укладываются в коридор шириной менее 1 дБ, а фазы не выходят за пределы 7° .

Таблица 2.

Интервалы изменений разностей $A_{dL} - A_{150}$ и $\phi_{dL} - \phi_{150}$, а также их средние по абсолютной величине значения (в скобках) для трасс, представленных в Табл. 1

	$dL = 50$ км	$dL = 100$ км	$dL = 200$ км	$dL = 250$ км
амплитуды МІК, дБ				
GBZ	-0.09...0.17 (0.06)	-0.13...0.07 (0.02)	-0.08...0.09 (0.02)	-0.14...0.10 (0.02)
GQD	-0.46...0.21 (0.21)	-0.06...0.09 (0.02)	-0.10...0.07 (0.02)	-0.09...0.15 (0.04)
DHO	-0.37...0.13 (0.06)	-0.11...0.06 (0.02)	-0.14...0.14 (0.02)	-0.13...0.19 (0.03)
TBB	-0.33...0.50 (0.09)	-0.35...0.30 (0.05)	-0.29...0.23 (0.06)	-0.28...0.20 (0.07)
амплитуды A118, дБ				
GBZ	-0.03...0.11 (0.03)	-0.04...0.06 (0.02)	-0.09...0.03 (0.03)	-0.09...0.03 (0.04)
GQD	-0.15...0.06 (0.02)	-0.11...0.06 (0.02)	-0.10...0.02 (0.04)	-0.05...0.06 (0.02)
DHO	-0.05...0.20 (0.05)	-0.03...0.15 (0.03)	-0.01...0.35 (0.10)	-0.03...0.79 (0.27)
фазы МІК, град				
GBZ	-0.60...1.60 (0.37)	-0.40...0.90 (0.18)	-0.40...0.70 (0.11)	-0.80...0.70 (0.22)
GQD	-1.60...1.20 (0.64)	-0.80...0.60 (0.20)	-0.70...0.60 (0.18)	-1.80...1.10 (0.39)
DHO	-1.20...2.00 (0.32)	-0.60...0.90 (0.29)	-0.70...0.80 (0.21)	-1.20...0.90 (0.32)
TBB	-3.50...2.70 (0.48)	-0.40...4.10 (0.35)	-0.40...3.50 (0.27)	-1.00...3.20 (0.28)
фазы A118, град				
GBZ	-0.90...0.30 (0.21)	-0.60...0.20 (0.15)	-0.20...0.40 (0.11)	-0.20...0.80 (0.27)
GQD	-1.50...0.00 (0.59)	-1.00...0.20 (0.39)	-0.10...0.80 (0.23)	-0.10...1.20 (0.38)
DHO	-0.20...1.30 (0.35)	-0.10...1.40 (0.33)	-1.50...0.30 (0.25)	-1.00...1.50 (0.61)

При этом оказалось, что наибольшее расхождение приходится на те варианты, которые соответствуют более слабому ионизирующему воздействию, в то время как в области сильных возмущений (во время вспышек) модель практически не чувствует изменение шага. На рис. 2 в качестве примера приведены результаты расчета амплитуд на трассе DHO – A118 для $dL = 150$ и 250 км. Вместе с тем, было обнаружено, что в случае $dL = 50$ км нередко наблюдаются физически необъяснимые скачки амплитуды, что свидетельствует о вычислительной неустойчивости модели. Пример такого расчета, соответствующий трассе GQD – МІК, показан на рис. 3.

В программе LWPM предусмотрена возможность вывода на печать дополнительной информации. В частности, задание во входном файле опции «PRINT-swg 1» позволяет получить данные о сегментации

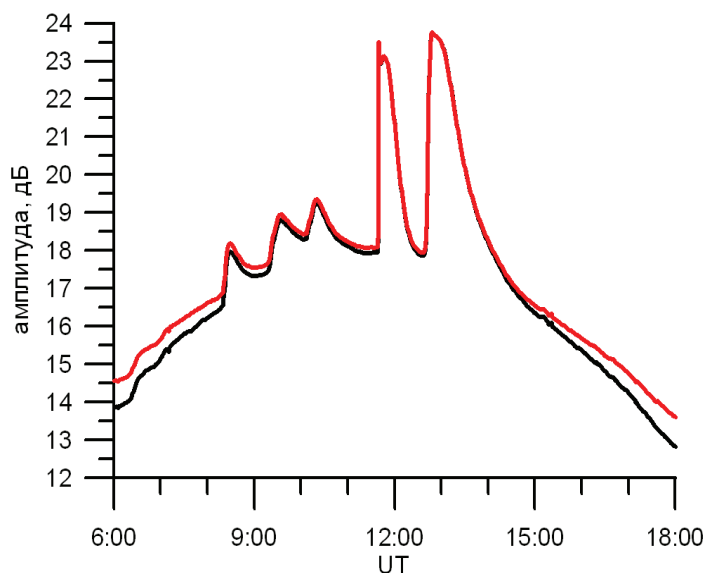


Рис. 2. Результаты расчета амплитуд на трассе DHO – A118 для $dL = 150$ (черная линия) и 250 км (красная линия)

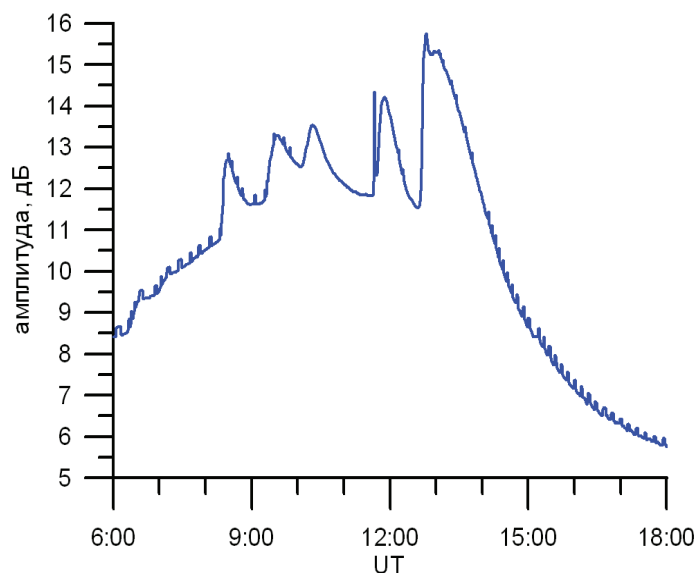


Рис. 3. Пример расчета амплитуд на трассе GQD – MUK, демонстрирующий наличие неустойчивости модели при $dL = 50$ км

трассы, а также значения электрофизических характеристик поверхности и магнитного поля Земли в точках, определяющих границы сегментов. Анализ данных, полученных таким образом для указанных выше случаев, показывает, что количество точек, а, следовательно, и расстояние между ними существенно зависит от значения dL : чем меньше dL , тем больше точек. Также установлено, что в ряде случаев длины сегментов оказываются равными 20 км. Такая величина противоречит рекомендациям описания программы, где указано, что длина сегмента не должна быть менее 100 км.

Для проведения дальнейших исследований мы воспользовались еще одной опцией программы LWPM. Задание во входном файле «lwpm.inp» режима «PRESEG» позволяет установить границы сегментов (расстояния от передатчика), а также задать в них характеристики магнитного поля и земной поверхности. Точки соответствуют левым (ближайшим к передатчику) концам сегментов. В случае, если заданы только расстояния, все остальные необходимые данные берутся в режиме «по умолчанию».

Данный инструмент позволил нам провести для каждой трассы серию из четырех связанных между собой вариантов расчетов. Однако реализация этой задачи требовала выполнения подготовительного этапа. Прежде всего, используя интернет приложение Google Earth, были определены точки на трассе, которые соответствуют пересечению ею береговой линии. Далее к этому набору были добавлены точки, которые соответствуют границам однородных по проводимости зон согласно [МЭС-R P.832-4, 2015] (в обоих случаях при расстановке точек принималось во внимание ограничение на минимальную длину сегмента). Конечным шагом этого этапа стала расстановка дополнительных точек с таким расчетом, чтобы длины получающихся сегментов преимущественно находились в диапазоне 100 – 150 км, а также соотнесение каждой точке значения проводимости земной поверхности. Полученное таким образом разбиение трассы на сегменты было использовано в следующих вариантах расчетов:

- задание проводимости и магнитного поля «по умолчанию» (*segment*);
- новые значения проводимости, но магнитное поле «по умолчанию» (*ground*);
- новые значения проводимости, а магнитное поле по модели IGRF-13 с привязкой к дате, соответствующей потокам солнечного излучения (*magnet*);
- добавление к предыдущему варианту частот соударений, которые вычислены по формулам (3)–(4), исходя из характеристик нейтральной атмосферы, которые были использованы в расчетах ионизации (*collision*).

Во всех случаях сетка, на которой была задана ионосфера, соответствовала шагу 150 км. Следует

отметить, что в режиме «PRESEG» распределение точек, в которых задана ионосфера, не влияет на количество сегментов и их длины.

Анализ полученных результатов был проведен в рамках использованного ранее подхода, где за «базовый» уровень приняты расчеты, отвечающие $dL = 150$ км при автоматическом разбиении трассы на сегменты. Интервалы изменений $A_V - A_{150}$ и $\phi_V - \phi_{150}$ (V – идентификатор варианта) приведены в Таблице 3.

Таблица 3.

Интервалы изменений разностей $A_V - A_{150}$ и $\phi_V - \phi_{150}$, а также их средние по абсолютной величине значения (в скобках) для трасс, представленных в Табл. 1

	<i>segment</i>	<i>ground</i>	<i>magnet</i>	<i>collision</i>
	амплитуды МІК, дБ			
GBZ	-0.12...0.11 (0.04)	-0.13...0.09 (0.04)	-0.13...0.09 (0.03)	-0.78...0.49 (0.32)
GQD	-0.30...-0.02 (0.14)	-0.37...-0.01 (0.20)	-0.38...-0.01 (0.21)	-2.27...0.41 (1.72)
DHO	-0.11...0.19 (0.03)	-0.11...0.19 (0.03)	-0.12...0.20 (0.04)	-1.02...2.10 (0.33)
TBB	-0.39...0.77 (0.16)	-0.66...0.55 (0.27)	-0.66...0.59 (0.23)	-1.51...2.94 (0.44)
	амплитуды A118, дБ			
GBZ	-0.10...0.34 (0.07)	-0.30...0.06 (0.21)	-0.21...0.04 (0.13)	-0.15...0.86 (0.07)
GQD	-0.01...0.02 (0.01)	-0.26...0.18 (0.06)	-0.25...0.29 (0.14)	-0.91...0.02 (0.36)
DHO	-0.10...0.57 (0.19)	0.09...0.46 (0.21)	0.04...0.58 (0.23)	-0.86...0.47 (0.64)
	фазы МІК, град			
GBZ	-1.40...-0.20 (0.82)	-2.00...-0.60 (1.35)	-2.00...-0.60 (1.35)	-12.90...0.20 (9.42)
GQD	-3.20...-1.50 (2.11)	-2.70...-0.20 (1.73)	-2.60...-0.20 (1.68)	-11.30...-1.50 (7.60)
DHO	-1.50...0.90 (0.46)	-1.50...0.90 (0.46)	-1.70...0.90 (0.49)	-10.30...12.90 (8.46)
TBB	-2.70...7.80 (2.77)	-2.60...7.20 (1.16)	-2.40...6.70 (1.08)	-14.00...19.30 (8.58)
	фазы A118, град			
GBZ	-2.60...1.50 (0.60)	-4.40...-1.90 (3.17)	-4.20...-1.80 (3.23)	-10.30...1.70 (8.38)
GQD	-0.10...0.10 (0.05)	-4.20...-1.80 (2.47)	-4.20...-1.80 (2.98)	-14.00...-5.30 (11.02)
DHO	-5.40...-2.30 (3.67)	2.70...5.40 (3.97)	2.10...5.20 (3.35)	-4.50...1.70 (2.24)

Из них видно, что изменение распределения границ сегментов увеличило разброс значений амплитуд до 1.2 дБ, а фаз до 11° . Использование обновленных значений проводимости почти не изменило картину, хотя в ряде случаев разброс значений фазы несколько уменьшился. Аналогичный результат получился после включения обновленных характеристик магнитного поля. При этом следует отметить, что, во-первых, влияние на фазу оказалось более сильным, чем на амплитуду, во-вторых, этот эффект зависит от угла между вектором магнитного поля и направлением распространения волны (волновым вектором) – чем больше продольная составляющая, тем больше эффект. Последнее утверждение позволяет предположить, что влияние изменения магнитного поля на радиотрассы, полностью расположенные в экваториальной области и ориентированные вдоль магнитного меридиана, а также на длинные радиотрассы, пересекающие экваториальную область со схожей ориентацией, может оказаться более серьезным, чем получилось в наших оценках, которые ограничены среднеширотными трассами средней протяженности.

Заключительная в нашем списке задача касается оценки влияния модели частот соударений на результаты расчетов. Различие между частотами соударений, которые опираются на характеристики нейтральной атмосферы, использованные при расчете ионизации, и частотами «по умолчанию» показано на рис. 4 в виде их отношения на примере точки, соответствующей станции МІК. Как видно из данных, приведенных в табл. 3 и представленных в графическом виде на рис. 5, разность между

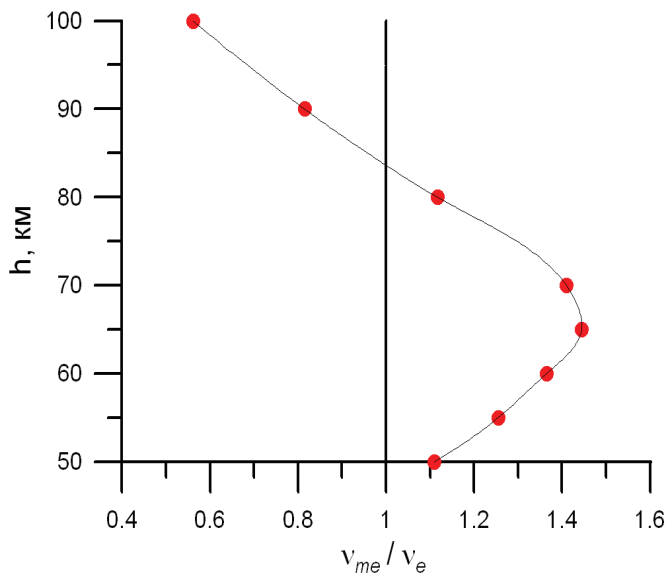


Рис. 4. Отношение частот соударений электронов, вычисленных по формулам (3) и (1) для точки, соответствующей станции МІК

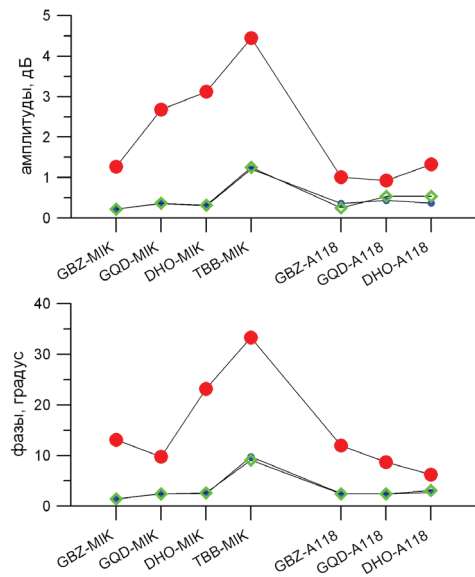


Рис. 5. Разности между максимальным и минимальным значениями $A_v - A_{150}$ (вверху) и $\phi_v - \phi_{150}$ (внизу) для трасс, представленных в Табл. 1. Цвета соответствуют вариантам (V): *ground* – синий, *magnet* – зеленый, *collision* – красный

максимальным и минимальным отклонением амплитуды от «базового» варианта увеличилась до нескольких децибел, а интервал изменения фаз – до нескольких десятков градусов. Также следует отметить, что в одном случае из семи (трасса ТВВ – МІК) можно говорить не только о количественном различии результатов моделирования распространения радиоволн, но и о качественном изменении картины. Качественное различие с нашей точки зрения демонстрируют амплитуды в диапазоне 14:00–16:30 UT и фазы в максимуме вспышки в районе 13:00 UT, показанные на рис. 6.

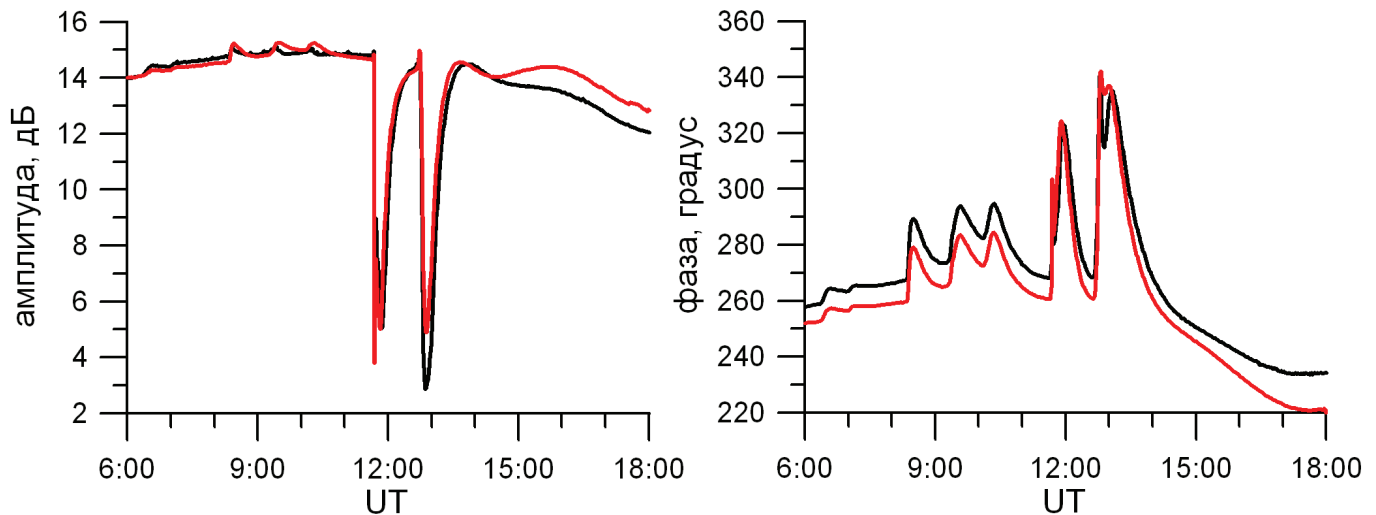


Рис. 6. Результаты расчета амплитуд (слева) и фаз (справа) на трассе ТВВ – МІК для «базового» варианта (черная линия) и варианта *collision* (красная линия)

Выводы и рекомендации

Модель LWPC предназначена для расчета распространения радиоволн ОНЧ–НЧ диапазона в неоднородном волноводе земля – ионосфера. Однако в ее основе лежит решение этой задачи для случая однородного вдоль трассы волновода. Модель LWPC входит в состав программного комплекса

LWPM, который также выполняет подготовительную работу по разбиению волновода, задаваемого координатами передатчика и приемника, на сегменты с постоянными значениями параметров ионосферы и земной поверхности.

Проведенное исследование показало, что результаты расчетов существенно зависят от варианта сегментирования трассы. В наиболее важном для задач геофизики режиме работы комплекса LWPM, когда вводятся только параметры ионосферы, а все остальные устанавливаются «по умолчанию», распределение точек вдоль трассы, в которых задаются вертикальные разрезы характеристик ионосферы, влияет на результат сегментирования. Анализ проведенных расчетов показал, что наиболее целесообразно задавать разрезы ионосферы с шагом $\sim 100\text{--}150$ км. Уменьшение длины шага не только не приводит к формированию сходящейся последовательности, что можно было бы ожидать, исходя из математических соображений, но даже увеличивает вероятность появления физически необоснованных скачков амплитуды. Таким образом, можно говорить о предельной точности, которую способна обеспечить модель LWPC. Эта точность зависит от трассы. Для рассмотренных вариантов она составляет $\sim 0.1\text{--}0.5$ дБ для амплитуды и $1^\circ\text{--}5^\circ$ для фазы.

Также установлено, что использование уточненных карт проводимости земной поверхности, а также учет изменения магнитного поля Земли за последние 40 лет, не дает значений, которые принципиально отличались бы от варианта «по умолчанию». В то же время, замена модели частот соударений с экспоненциальной, которая принята «по умолчанию», на расчет по формулам (3)–(4), исходя из реальных (принятых при моделировании уровня ионизации) значений параметров нейтральной атмосферы, может существенно повлиять на результаты расчетов. В рассмотренных нами случаях ширина коридора значений, который определяет отклонение от «базового» варианта, увеличилась для амплитуды до нескольких децибел, а для фазы – до нескольких десятков градусов. Однако для большинства трасс варианты расчетов «по умолчанию» и с уточненной моделью частот соударений качественно совпадают, поэтому первый из них можно использовать для получения «нулевого» приближения.

В заключении следует подчеркнуть, что при использовании модели LWPC как инструмента верификации геофизических моделей, который предусматривает сравнение с натурными радиофизическими измерениями, необходимо провести оценку точности расчетов LWPC на рассматриваемых трассах. Для этого в первом приближении достаточно получить разброс значений моделирования распространения радиоволн, задавая характеристики непостоянной вдоль трассы ионосферы с шагами 100, 150 и 200 км аналогично тому, как это было сделано в настоящей статье.

Последнее, на что хотелось бы обратить внимание – это вопросы, которые не были затронуты в нашей работе. Приближение, заложенное в LWPC для расчета компонент тензора комплексной диэлектрической проницаемости, ограничено представлением плазмы как четырехкомпонентной квазинейтральной среды, состоящей из нейтральных частиц, электронов, положительных и отрицательных ионов. Хотя формально заряды ионов являются входными параметрами программы, на самом деле некоторые блоки программы написаны только для случаев однократно заряженных ионов. Такая особенность не создает проблем для интересующих нас задач, так как в D-слое доля многократно заряженных ионов пренебрежимо мала. Еще одно заложенное в LWPC предположение касается молярных весов частиц. Программа написана так, что веса ионов, которые также являются входными параметрами («по умолчанию» молярные веса равны примерно 31.6 а.е.м.), определяются для всего вертикального разреза и не зависят от высоты. Однако на самом деле ионный состав достаточно сильно зависит от высоты, при этом массы ионов могут отличаться в 1.5–2 раза и даже больше. Вопрос о том, как данное обстоятельство влияет на результат и как его учитывать при использовании имеющейся версии LWPC остается открытым.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема 122032900184-8).

Список литературы

- Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М. : Наука, 1967. Изд. 2. – 684 с.
- МЭС-R P.832-4. Рекомендация МЭС-R P.832-4 (07/2015). Мировой атлас проводимости почвы: Серия Р. Распространение радиоволн. <http://www.itu.int/rec/R-REC-P.832>
- Никольский В.В. Вариационные методы для задач дифракции. (Обзор) // Известия Вузов. Радиофизика. 1977. Т. 20. № 1. С. 5–44.
- Alken *et al.* International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation // *Earth, Planets and Space*. 2021. Vol. 73 (49). <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01288-x>
- Bekker S.Z., Kozlov S.I., Kudryavcev V.P. Comparison and verification of the different schemes for the ionization-recombination cycle of the ionospheric D-region // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2022 Vol. 127. P. e2022JA030579. <https://doi.org/10.1029/2022JA030579>
- Bekker S.Z., Ryakhovskii I.A., Korsunskaya J.A. Modeling of the Lower Ionosphere During Solar X-Ray Flares of Different Classes // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2021. Vol. 126 (2). <https://doi.org/10.1029/2020JA028767>
- Ferguson J.A. Snyder F.P. Approximate VLF/LF Waveguide Mode Conversion Model Computer Application: FASTMC and BUMP TD 400. (Nov) Naval Ocean Systems Center, San Diego, CA, NOSC-TD-400, Nov. 1980. Accessed: May 08, 2017. <https://www.dtic.mil/docs/citations/ADA096240>
- Ferguson J.A. Computer Programs for Assessment of Long Wavelength Radio Communications. 1998. Version 2.0; User's Guide and Source Files. TD 3030 (May) Space and Naval Warfare Systems Center, San Diego, CA.
- Morgan R.R. World-wide VLF Effective Conductivity Map. Westinghouse Electric Corporation Report. 1968. P. 8013F-1.
- Ryakhovskii I.A., Gavrilov B.G., Poklad Yu.V., Bekker S.Z., Ermak V.M. The State and Dynamics of the Ionosphere from Synchronous Records of ULF/VLF and HF/VHF Radio Signals at Geophysical Observatory «Mikhnevo» // *Izv. Physics of the Solid Earth*. 2021. Vol. 57 (5). P. 718–730. <https://doi.org/10.1134/S1069351321050177>

SOME ASPECTS OF THE LWPC MODEL USAGE IN GEOPHYSICS PROBLEMS

© 2023 J. A. Korsunskaja^{1,*}, S. Z. Bekker¹

¹*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**E-mail: jukor@idg.chph.ras.ru*

The LWPC radio-physical model is intended for calculating the propagation of VLF-LF radio waves in the earth-ionosphere waveguide channel. It is an open-access program. Thus, many ionosphere and atmosphere geophysics researchers use the program as a tool for verifying the models by comparing theoretical results with the radio-field measurements. However, it is necessary to know what accuracy LWPC provides and what the influence of various model parameters is in order to obtain correct conclusions. This information is not available in the program user's guide, so this work makes an attempt to compensate for this shortcoming. Analysis of considered variants allowed us to draw the following conclusions. The accuracy of the model is ~0.1–0.5 dB for amplitude and 1° – 5° for phase and depends on the path (coordinates of the transmitter and receiver and frequency). The program reaches this accuracy when specifying the ionosphere with a step of 100–150 km along the path. Replacing the built-in models of the ground conductivity and the Earth's magnetic field by actual versions does not have a significant impact on the calculation results. The fundamental difference was obtained by replacing the collision frequencies, which are based on the standard exponential altitude dependence, with values calculated according to the distribution of neutral medium parameters. In this case, the difference in amplitudes reaches several decibels, and phases – several tens of degrees.

Keywords: ionosphere geophysics, D-layer, radio waves, VLF range, model verification.