

ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В МАГНИТОСФЕРЕ: К СТОЛЕТИЮ В.А. ТРОИЦКОЙ

**А.В. Гульельми¹, А.С. Потапов², Б.В. Довбня³, О.Д. Зотов³,
Б.И. Клайн³, В.Ф. Рубан⁵, И.В. Стерликова⁴, И.П. Лавров³**

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва

² Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

³ ГФО Борок ИФЗ РАН, Ярославская обл., п. Борок

⁴ Московский психолого-социальный университет, Филиал ОАНО МПСУ,
г. Муром

⁵ Страховой документальный фонд, Филиал Архива РАН, Ярославская обл.,
п. Борок

Статья посвящается памяти Валерии Алексеевны Троицкой (1917–2010 гг.). В этом году ей исполнилось бы 100 лет. В статье мы представляем лишь один аспект многогранной творческой активности проф. В.А. Троицкой. Речь идет об исследовании триггерных эффектов в магнитосфере на материале наблюдения ультранизкочастотных электромагнитных колебаний. Это направление живо интересовало Валерию Алексеевну.

Введение

Мы, ученики и сотрудники выдающегося ученого профессора Валерии Алексеевны Троицкой, посвящаем эту статью ее памяти. В этом году ей исполнилось бы 100 лет. В статье мы представляем один из аспектов многогранной творческой активности В.А. Троицкой. Речь идет об исследовании триггерных эффектов в магнитосфере Земли. Это направление исследований живо интересовало Валерию Алексеевну. В частности, ей принадлежит открытие УНЧ колебаний типа *Ipdp* (*Interval of pulsations of diminishing period*), возникающих после специфической переориентации межпланетного магнитного поля (ММП) [Troitskaya, 1961]. О других аспектах исследовательской деятельности В.А. Троицкой см. в статье [Гульельми, Потапов, 2017а].

Эффект курантов или Биг-Бен эффект

В России курантами издавна называют часы, исполняющие музыку каждые четверть часа, полчаса и час. Например, поэт Державин писал: «Курант духовный, повсеместный: / Лишь только заведи / И прочь поди, / Играет арии небесны». Об одной из «небесных арий» такого рода мы и поговорим в данном разделе нашей статьи.

Речь пойдет об УНЧ электромагнитных колебаниях *Pc1* [Троицкая, 1964]. Они действительно зарождаются «в небесах» – в ионосфере и магнитосфере. На по-

верхности Земли Pc1 наблюдаются в форме двух разновидностей. Первую разновидность называют «жемчужины» (в дальнейшем будем писать без кавычек). Им посвящена обширная литература. Сошлемся здесь на обзоры [Troitskaya, Guglielmi, 1967; Троицкая, Гульельми, 1969; Гульельми, 2007] и монографию [Гульельми, Троицкая, 1973]. Это исключительно красивые колебания, и они особо интесировали Валерию Алексеевну.

В 1976 г. Б.В. Довбня наблюдал УНЧ колебания в Тикси и обнаружил свойство жемчужин, которое не только не соответствовало общепринятым представлениям о происхождении этих колебаний, но, казалось бы, противоречило здравому смыслу. Мы напомним, что жемчужины самовозбуждаются во внешнем радиационном поясе, распространяются вниз вдоль геомагнитных силовых линий, проникают в ионосферный волновод и, распространяясь по волноводу вдоль земной поверхности, достигают точки наблюдения. И вот оказалось, что вопреки здравому смыслу режим возбуждения и/или распространения жемчужин контролируется боем курантов. Лишь после тщательного обдумывания мы решились опубликовать статью [Гульельми и др., 1978], а в дальнейшем произвели многократную проверку. Мы называем обнаруженное явление эффектом курантов. Употребительны также названия эффект часовых меток и Биг-Бен эффект (см., например, [Гульельми, Зотов, 2010; 2012; Гульельми и др., 2011]). Верхние две панели на рис. 1 иллюстрируют эффект курантов при наблюдении жемчужин.

Обратимся теперь ко второй из двух разновидностей Pc1, указанных нами выше. Ее называют IAR (*Ionospheric Alfvén resonances*) [Беляев и др., 1989]. Эта разновидность колебаний возбуждается в ионосфере. Теория базируется на представлении о резонансных колебаниях Альвена в слое F ионосферы. Нижние две панели на рис. 1 иллюстрируют эффект курантов при наблюдении IAR. Легче всего наши наблюдения было бы объяснить простым совпадением. Такое объяснение иногда нам предлагали в кулуарах конференций. С этим трудно согласиться. Эффект демонстрируют не только спектры на рис. 1, но и многочисленные спектры такого рода, накопленные нами за десятилетия наблюдений. Однако, обнаруженный нами эффект настолько необычен, что наглядность может показаться недостаточным ар-

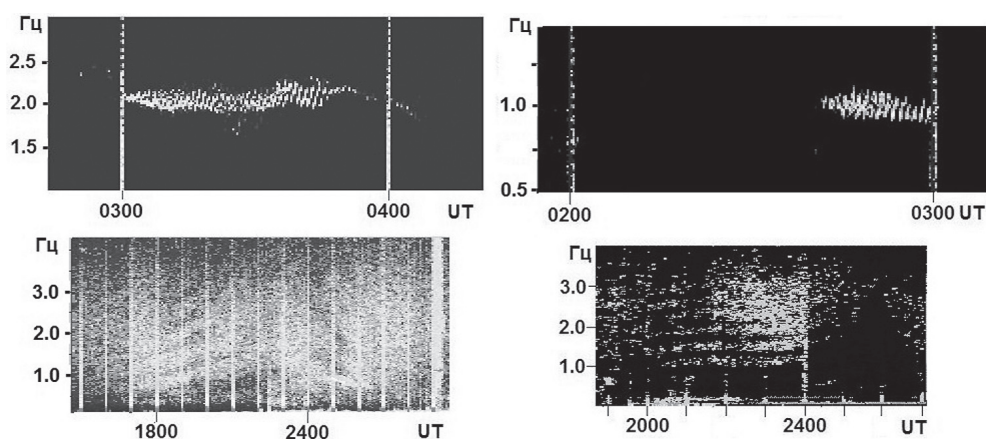


Рис. 1. Динамические спектры жемчужин (вверху) и IAR (внизу) по данным ГФО Борок. Возбуждение и гашение жемчужин (IAR) наблюдалось 22.11.1984 и 04.08.1985 гг. (07.08.1985 и 08.09.1988 гг.) соответственно [Гульельми и др., 2011]

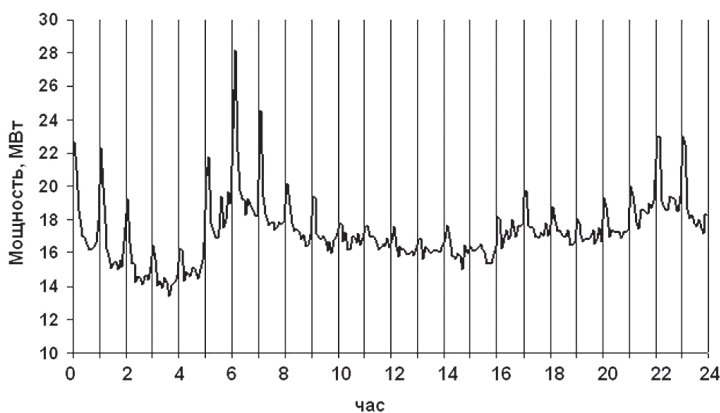


Рис. 2. Эффект часовых меток в одном из крупнейших промышленных регионов планеты [Гульельми, Зотов, 2012]

гументом. Поэтому в статье [Гульельми, Зотов, 2010] приведен результат статистического анализа для того, чтобы подтвердить факт синхронизации режима возбуждения P_{c1} по часам мирового времени. Авторы статьи воспользовались каталогом жемчужин, который на протяжении десятилетий составляла Э.Т. Матвеева, ученица проф. В.А. Троицкой. Каталог содержит информацию о жемчужинах, зарегистрированных за 40 лет непрерывных наблюдений в Бороке. Результат анализа свидетельствует о статистической достоверности эффекта.

Часовые пульсации индустриальной активности человечества действительно существуют. Они обнаружены нами напрямую [Гульельми, Зотов, 2012] (см. рис. 2). Пульсации создаются спонтанно многими миллионами потребителей энергии, живущими по часам и неосознанно формирующими эффект курантов в техносфере. Подчеркнем, что синхронные пульсации мирового энергопотребления выявлены нами геофизическим методом.

Эффект переориентации форшока

На третьем Всероссийском семинаре-совещании «Триггерные эффекты в геосистемах» была представлена программа теоретического и экспериментального изучения ключевой роли ММП в формировании режима колебаний магнитосферы Земли. [Гульельми и др., 2015]. В данном разделе статьи мы представим два результата реализации указанной программы. Первый результат относится к зависимости возбуждения IAR от ориентации ММП. Он подробно описан в недавно опубликованной статье [Гульельми, Потапов, 2017]. Поэтому ограничимся здесь краткими пояснениями.

На рис. 3 мы видим сечение магнитосферы плоскостью полуденного меридиана. Пунктирная линия изображает фронт околосветной ударной волны. Наклонные сплошные линии изображают проекции силовых линий ММП на плоскость фигуры. За ударным фронтом силовые линии имеют довольно сложную конфигурацию и здесь не показаны. Область форшока ограничена фронтом и той силовой линией, которая касается этого фронта. На левой и правой панелях указаны значения дихотомической переменной $\sigma = \text{sign}(B_x B_z)$. Мы видим, что север-южная асим-

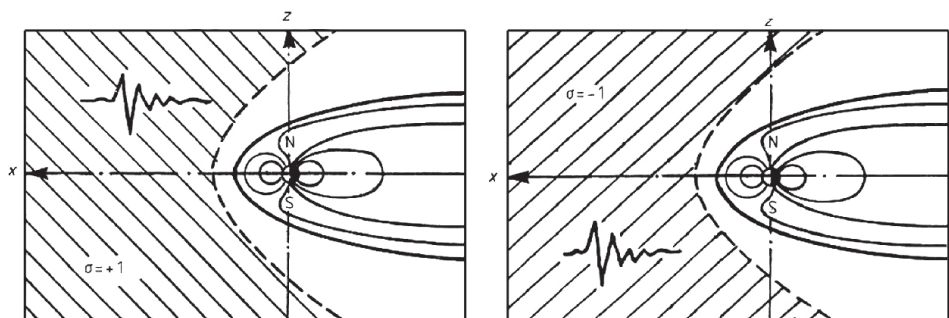


Рис. 3. Меридиональные сечения магнитосферы [Гульельми, Потапов, 20176]

метрия расположения форшока качественно изменяется при изменении σ . Можно предположить, что электромагнитные волны, возбужденные в области форшока, будут проникать по преимуществу в южное полушарие при $\sigma = -1$ и в северное полушарие при $\sigma = +1$. Эти соображения подсказывают нам, что активность IAR, зарегистрированных в обсерватории северного полушария, выше при $\sigma = +1$, чем при $\sigma = -1$. Наблюдения IAR в обсерватории Монды ИСЗФ СО РАН подтвердили наше предсказание.

Второй результат относится к длиннопериодным колебаниям Irc1 (*Irregular pulsations continuous long*) [Куражковская, Клайн, 2012]. Пример УНЧ колебаний типа Irc1 представлен на рис. 4. Колебания наблюдались в обс. Мирный, расположенной в Антарктиде. Следует сказать, что в ГФО «Борок» ИФЗ РАН хранится богатейший архив УНЧ колебаний, которые были зарегистрированы в Мирном во время антарктических экспедиций ИФЗ АН СССР, организованных В.А. Троицкой.

Чтобы проанализировать Irc1 на предмет проверки гипотезы об активизации Irc1 при $\sigma = -1$, то есть благоприятной ориентации форшока, Б.И. Клайн использовал указанные архивные материалы, а также базу данных МЦД (<http://www.wdcb.ru/stp/index.ru.html>). Результат анализа амплитудного распределения Irc1 безусловно подтвердил нашу гипотезу. Активность Irc1 в Мирном выше при $\sigma = -1$, чем при $\sigma = +1$. Различие достоверно на уровне 0,95 по критерию Фишера (рис. 5).

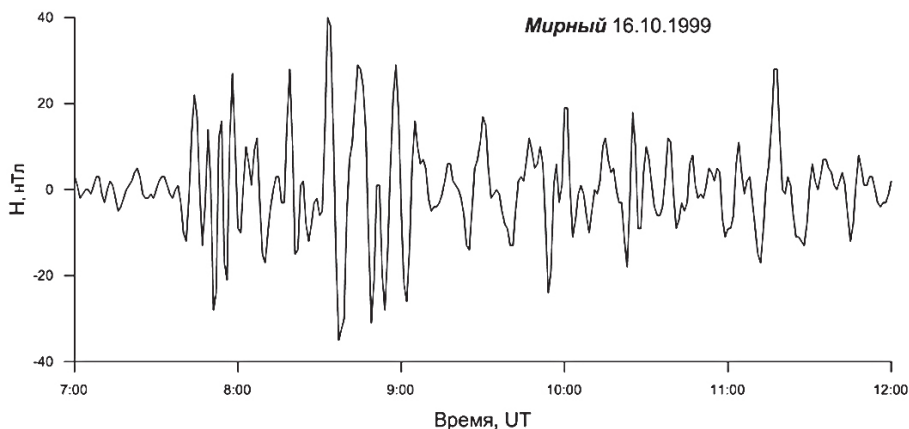


Рис. 4. Магнитограмма УНЧ колебаний Irc1, зарегистрированных в Антарктиде

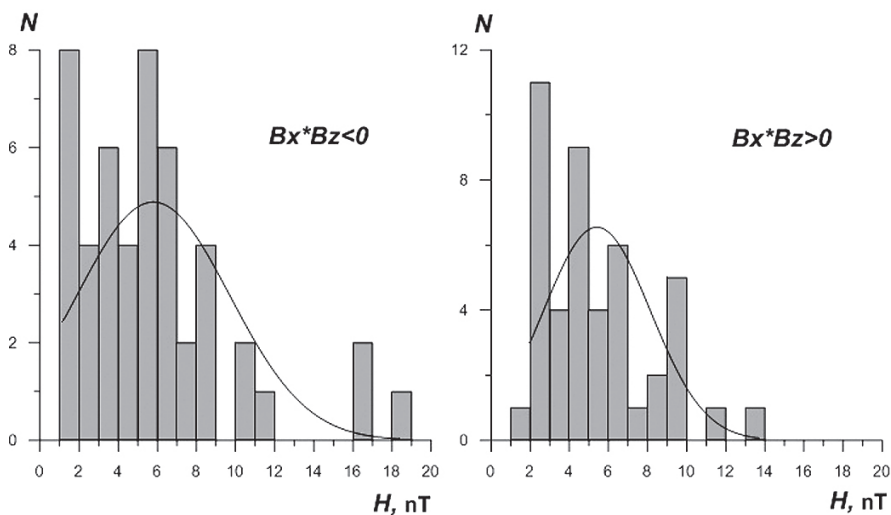


Рис. 5. Распределения УНЧ колебаний типа Irc1 по амплитуде

Обсуждение

Мы рассказали далеко не все о триггерных эффектах в магнитосфере. К сказанному можно было бы добавить, например, опережающий и запаздывающий эффекты межпланетных ударных волн [Guglielmi et al., 2000]. Не менее интересны эффекты секторной структуры ММП. О.Д. Зотов обнаружил слабую, но вполне определенную вариацию глобальной сейсмичности при пересечении Землей границы между секторами с противоположной направленностью ММП (к Солнцу, или от Солнца). Известно также, что при пересечении границы повышается активность жемчужин.

Обратим внимание на интересную особенность секторной границы: на ней сосредоточено сильное поле векторного потенциала магнитного поля. Другими словами, при пересечении границы происходит резкое изменение ориентации ММП и, вместе с тем, возникает также мощная вариация величины векторного потенциала. В этой связи давайте вспомним, что по данным гелиобиологии изменчивость магнитного поля определенным образом влияет на человека [Бреус и др., 2016]. В частности, она влияет на космонавта при пересечении космическим аппаратом секторной границы. Вполне понятно, что если рассматривать живой организм как классический объект, то вариацию величины векторного потенциала можно полностью игнорировать. Но у нас нет оснований исключить гипотезу о том, что живой организм является макроскопическим квантовым объектом [Гульельми, Рубан, 2016]. В таком случае величиной векторного потенциала пренебрегать нельзя, поскольку от нее зависит фаза комплексной волновой функции организма. В работе [Гульельми, Рубан, 2016] сформулирована программа лабораторного исследования этой проблемы и описана оригинальная конструкция так называемого Φ -источника поля A , то есть поля векторного потенциала.

Общий вид лабораторной установки показан на рис. 6. Для поиска зависимости поведения живой материи от векторного потенциала В.Ф. Рубан выбрал зеленую протококковую водоросль *Chlorella vulgaris* Beyerinck. (Культура любезно пре-

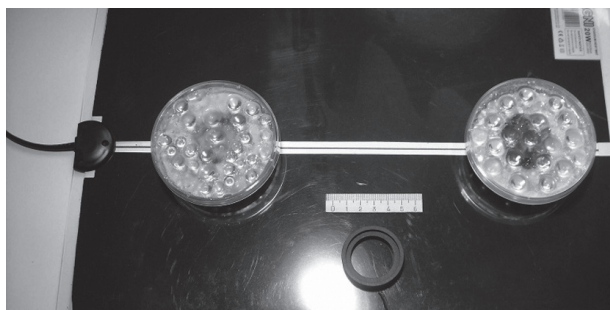


Рис. 6. Лабораторная установка для изучения воздействия на организмы векторного потенциала магнитного поля

доставлена ему кафедрой гидробиологии МГУ.) Препарат размещен в двух чашках Петри – опытной, находящейся над Ф-источником, и контрольной. Чашки вместе с источником А-поля и муляжом источника установлены на коврик подогрева мощностью 20 Вт. Приняты меры для того, чтобы обе чашки находились в строго одинаковых условиях (освещённость, температура, объём препарата). В процессе эксперимента контролировалась температура в помещении, температура чашек и температура коврика. Периодически выполнялось фотографирование препаратов для фиксации различий в цветовой насыщенности и конфигурации цветных пятен. На шестой день эксперимента в чашке над Ф-источником образовалось заметное зелёное пятно, по размерам и расположению совпадающее с площадью действующего А-поля. В дальнейшем, однако, пятно появилось и в контрольной чашке, но значительно более слабое.

Мы описали здесь предварительный результат одного из проведенных экспериментов лишь для того, чтобы информировать научную общественность о направлении и характере наших поисков. Вполне понятно, что нам предстоит еще долгий и кропотливый труд. Но как бы ни оценивать наши шансы на успех, эксперименты такого рода следует проводить, поскольку результат может оказаться важным с точки зрения магнитобиологии. В порядке обсуждения интересно было бы рассмотреть еще и вопрос об использовании Ф-источника в магнетохимии. Ограничимся здесь лишь постановкой вопроса, вполне аналогичного тому, который был поставлен в работе [Гульельми, Рубан, 2016]: нет ли зависимости химической реакционной способности в макрообъеме реагентов от векторного потенциала А? Однако формат данной статьи не позволяет развернуть эту тему.

Заключение

Валерия Алексеевна как-то сказала, что цель науки, помимо всего прочего, состоит в том, чтобы доставлять исследователю интеллектуальное наслаждение. В этом отношении наука сродни искусству. Занятия наукой и искусством роднит еще и то, что в обоих случаях от автора требуется высокое мастерство и в отделке деталей произведения, и в достижении совершенства общей композиции. Профессор Троицкая владела мастерством, необходимым исследователю. И мы, ее ученики, по мере способностей старались перенять это мастерство. Быть может поэтому идеи физики УНЧ колебаний магнитосферы, зародившиеся более полувека тому назад в научной школе под руководством В.А. Троицкой, не потеряли привлекательности в наши дни. Более того, они продолжают развиваться, а проблематика обогащается новыми нетривиальными задачами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы 28 Президиума РАН и РФФИ (проекты №№ 16-05-00056 и 16-05-00631).

Литература

Беляев П.П., Поляков С.В., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. Теория формирования резонансной структуры атмосферного электромагнитного шумового фона в диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций // Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т. 32. № 7. С. 802–810.

Бреус Т.К., Бинги В.Н., Петрукович А.А. Магнитный фактор солнечно-земных связей и его влияние на человека: физические проблемы и перспективы // УФН. 2016. Т. 186. С. 568–576.

Гульельми А.В. Ультранизкочастотные электромагнитные волны в коре и в магнитосфере Земли // УФН. 2007. Т. 177. № 12. С. 1257–1276.

Гульельми А.В., Довбня Б.В., Клайн Б.И., Пархомов В.А. Стимулированное возбуждение альвеновских волн импульсным радиоизлучением // Геомагнетизм и аэрономия. 1978. Т. 18. № 1. С. 179–181.

Гульельми А.В., Довбня Б.В., Потапов А.С., Хаякава М. Эффект часовых меток в активности электромагнитных колебаний Pc1 как свидетельство антропогенного воздействия на ионосферу и магнитосферу // Солнечно-земная физика. 2011. Вып. 19. С. 88–92.

Гульельми А.В., Зотов О.Д. 15-минутная модуляция геоэлектромагнитных волн Pc1 // Геофизические исследования. 2010. Т. 11. № 1. С. 64–71.

Гульельми А.В., Зотов О.Д. Явление синхронизма в динамической системе магнитосфера-техносфера-литосфера // Физика Земли. 2012. № 6. С. 23–33.

Гульельми А.В., Потапов А.С. Волны от Солнца: К столетию со дня рождения В.А. Троицкой // Солнечно-земная физика. 2017а. Т. 3. № 3.

Гульельми А.В., Потапов А.С. Влияние межпланетного магнитного поля на УНЧ колебания ионосферного резонатора // Космические исследования. 2017б. Т. 55. № 4. С. 263–267.

Гульельми А.В., Потапов А.С., Довбня Б.В. Ключевая роль межпланетного магнитного поля в формировании режима колебаний магнитосферы Земли // Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 16–19 июня 2015 г.): материалы третьего Всероссийского семинара-совещания / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. М. : ГЕОС. 2015. С. 328–334.

Гульельми А.В., Рубан В.Ф. К 120-летию со дня рождения А.Л. Чижевского // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2. № 4. С. 98–103.

Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М. : Наука. 1973. – 208 с.

Куражковская Н.А., Клайн Б.И. Влияние параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля на формирование всплесковых режимов длиннопериодных иррегулярных пульсаций // Геомагнетизм и аэрономия. 2012. Т. 52. № 4. С. 482–493.

Троицкая В.А. Классификация быстрых вариаций магнитного поля и земных токов // Геомагнетизм и аэрономия. 1964. Т. 4. № 3. С. 615–616.

Троицкая В.А., Гульельми А.В. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы // УФН. 1969. Т. 97. № 3. С. 453–494.

Guglielmi, A., Kangas J., Kultima J., Potapov A. An increase in Pc 1 wave activity prior to magnetic sudden impulses SI // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. P. 25185–25190.

Troitskaya V.A. Pulsations of the Earth's electromagnetic field with periods of 1-15 sec and their connection with phenomena in the high atmosphere // *J. Geophys. Res.* 1961. V. 66. № 1. P. 5–18.

Troitskaya V.A., Guglielmi A.V. Geomagnetic micropulsations and diagnostics of the magnetosphere // *Space Sci. Rev.* 1967. V. 7. № 5/6. P. 689–769.

УДК 551.510.413.5

УТОЧНЕНИЕ ИСХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТЕРМИНИРОВАННО-ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ D-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ И СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

С.З. Беккер

Институт динамики геосфер РАН, Москва

Рассматриваются новые методы уточнения детерминированно-вероятностной модели ионосферы на примере D-области. Сравниваются плотности вероятности входных параметров, рассчитанные в 2014 и 2017 гг. Обсуждаются плюсы и минусы усовершенствованной модели, и предложены новые способы повышения ее точности.

Введение

Ионосфера как непостоянная непрерывно изменяющаяся среда корректно может быть описана исключительно вероятностными моделями. На сегодняшний день ни у нас, ни за рубежом такие модели практически не разрабатываются. Наиболее перспективной из вероятностных моделей является детерминированно-вероятностная модель, в которой варьируются параметры, входящие в уравнения ионизационно-рекомбинационного цикла. Первый вариант такой модели был разработан в 2014 году на примере D-области ионосферы в интересах решения задач распространения СДВ-ДВ волн [Козлов и др., 2014; Беккер, 2014]. Анализ системы уравнений с учетом современных представлений о D-области на высотах ниже 100 км показал, что наиболее изменчивыми (или неизвестными) параметрами являются: α_i , α_d , q , $[\text{CO}_2]$, $[\text{H}_2\text{O}]$, $[\text{O}_3]$ и T . В 2014 г. средние значения, пределы варьирования и законы распределения этих параметров были выбраны на основании анализа большого объема литературы. Однако стоит отметить, что такая оценка носила довольно приблизительный характер. По рассчитанным электронным профилям были построены кривые плотности вероятности распределения амплитуды СДВ волны на среднеширотной трассе длиной ~2000 км. Полученные кривые в различных