

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИДГ РАН

доктор физ.-мат. наук

С.Б. Турунтаев

2022 г.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского  
Российской академии наук

Диссертация «Трехмерные численные модели Шумановского резонанса для исследования нижней ионосферы» выполнена в лаборатории Электродинамических процессов в геофизике ИДГ РАН в период обучения Гончарова Егора Сергеевича в аспирантуре ИДГ РАН с 2017 по 2020 год.

Гончаров Егор Сергеевич родился 27.10.1992 в г. Инта. В 2017 году окончил магистратуру факультета аэрофизики и космических исследований Московского физико-технического института (Государственного университета) по специальности «Прикладные математика и физика».

Удостоверение №33 о сдаче кандидатских экзаменов выдано в ИДГ РАН «05» ноября 2019 года.

Научный руководитель — кандидат технических наук Ляхов Андрей Николаевич, заместитель директора ИДГ РАН, заведующий лабораторией электродинамических процессов в геофизике ИДГ РАН.

Представление диссертационной работы проводилось на заседании семинара Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН. По итогам обсуждения диссертации «Трехмерные численные модели Шумановского резонанса для исследования нижней ионосферы» **принято следующее решение:**

Диссертация Гончарова Е.С. является научно-квалифицированной работой, в которой разработана трехмерная параллельная вычислительная модель распространения электромагнитных волн в нижней ионосфере Земли, позволяющая использовать данные регистрации параметров Шумановских резонансов для исследования нижней ионосферы и верификации эмпирических и теоретических моделей физических и химических процессов.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- Реализованы и верифицированы два трехмерных численных метода для расчета распространения электромагнитных волн в нижней ионосфере с учетом трехмерной неоднородности, произвольного ионного состава, конечной проводимости поверхности, произвольной локализации источника электромагнитного сигнала.
- Предложено использование Шумановских резонансов для глобальной верификации эмпирических и теоретических моделей нижней ионосферы.

- Определены оптимальные параметры и алгоритмы обработки первичных данных измерений вариаций геомагнитного поля в диапазоне частот 3-30 Гц для восстановления параметров Шумановских резонансов (собственные частоты, интенсивности, добротности).
- Исследована динамика параметров Шумановских резонансов в 2016-2020 годах по данным среднеширотной обсерватории «Михнево» Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН. Полученные результаты используются для проверки корректности воспроизведения сезонной и межгодовой изменчивости нижней ионосферы существующими моделями.
- Обнаруженные сигнатуры планетарных волн в параметрах Шумановских резонансов позволяют использовать экспериментальные данные для верификации глобальных динамических моделей средней атмосферы и нижней ионосферы.

**Практическая значимость** приведенных в работе результатов состоит в том, что разработанные средства численного моделирования распространения электромагнитных волн в трехмерной неоднородной ионосферной плазме могут быть использованы для сигналов произвольной временной зависимости и проведения самосогласованных расчетов воздействия интенсивного электромагнитного излучения на ионосферу с учетом нелинейных эффектов.

Предложенная методика проверки теоретических моделей нижней ионосферы на основе сравнения расчетных и наблюдаемых параметров Шумановских резонансов может быть применена для проверки прогностических моделей нижней ионосферы и атмосферы нового поколения и исследования медленных трендов атмосферных параметров.

**Достоверность полученных результатов** обеспечена верификацией используемых численных методов на точных аналитических и известных численных решениях, а также сопоставлением полученных экспериментальных результатов с независимыми результатами исследования Шумановских резонансов и глобальной грозовой активности.

В соответствии с поставленными в рамках исследования задачами, автором лично были разработаны параллельные программные средства численного моделирования распространения электромагнитных волн в ионосфере, основанные на методах конечных элементов и методе конечных разностей, выполнена их верификация на точных решениях и целевых расчетах с использованием разных моделей нижней ионосферы. Автор самостоятельно провел исследования с целью выбора оптимальных параметров алгоритма обработки первичных данных регистрации магнитного поля в ГФО «Михнево» и выполнил расчет параметров Шумановских резонансов.

Работа соответствует паспорту специальности 25.00.29 – «Физика атмосферы и гидросферы».

Основные результаты диссертационного исследования были доложены автором на 2 семинарах, 5 международных и 4 отечественных конференциях. По основным результатам диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе 6 публикаций в рецензируемых изданиях, входящих в систему Web Of Science:

1. **Goncharov E.S.**, Lyakhov A.N., Loseva T.V. 3D-FEM simulation model of the Earth-ionosphere cavity // *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2019. Vol. 33, no. 6. P. 734-742.

2. **Goncharov E.S.**, Lyakhov A.N., Losseva T.V. Long-term Schumann resonance dynamics based on horizontal magnetic field data at Mikhnevo observatory during 2016-2020 // *Radio Science*. 2022. Vol. 57, no. 5.

3. **Goncharov E.S.**, Lyakhov A.N., Losseva T.V. Seasonal Schumann Resonance variations according to magnetic field measurements at Mikhnevo observatory // *27th International*

Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. Vol. 11916 / ed. by G.G. Matvienko, O.A. Romanovskii. International Society for Optics, Photonics. SPIE, 2021. P. 1672-1678.

4. Frontiers in the D-region physics / A.N. Lyakhov [et al.] // 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. Vol. 11208 / ed. by O.A. Romanovskii, G.G. Matvienko. SPIE, 2019. P. 1875-1879.

5. Lyakhov A.N., **Goncharov E.S.**, Losseva T.V. FDTD, FDFD, and mode sum methods for VLF-LF propagation in the lower ionosphere // 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. Vol. 11560 / ed. by G.G. Matvienko, O.A. Romanovskii. International Society for Optics, Photonics. SPIE, 2020. P. 1885-1889.

6. Lyakhov A.N., **Goncharov E.S.**, Losseva T.V. The numerical simulation of ELF-LF propagation in the Earth-ionosphere waveguide under WACCM-X results // 27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. Vol. 11916. / ed. by G.G. Matvienko, O.A. Romanovskii. International Society for Optics, Photonics. SPIE, 2021. P. 1665-1671.

7. **Goncharov E.S.**, Lyakhov A.N., Losseva T.V. Long-term Schumann resonance dynamics based on horizontal magnetic field data at Mikhnevo observatory during 2016-2020 // Radio Science. 2022. Vol. 57, no. 5.

8. **Гончаров Е.С.**, Ляхов А.Н., Лосева Т.В. Влияние солнечных вспышек на частоты Шумановского резонанса // Гелиогеофизические исследования в Арктике. Сборник трудов конференции (Полярный геофизический институт). Кольский научный центр Российской академии наук (Апатиты), 2016. С. 15-18.


9. **Гончаров Е.С.**, Ляхов А.Н., Лосева Т.В. О возможности верификации моделей нижней ионосферы по наблюдениям Шумановских резонансов // Динамические процессы в геосферах. 2017. № 9. С. 124-130.

Диссертация Гончарова Егора Сергеевича «Трехмерные численные модели Шумановского резонанса для исследования нижней ионосферы» представляет собой законченное исследование, выполненное на высоком научном уровне, содержит важные научные результаты, отвечающие требованиям ВАК, и соответствует шифру специальности 25.00.29 – «Физика атмосферы и гидросферы». Полученные научные результаты отвечают ее формуле в части «Строение и физика средней атмосферы, верхней атмосферы и ионосферы, включая влияние ионосферы на распространение радиоволн».

Диссертация рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – «Физика атмосферы и гидросферы».

Заключение принято на заседании научного семинара Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН от 20 июня 2022 г.

кандидат физ.-мат. наук,  
Ученый секретарь ИДГ РАН

 / Д. Н. Локтев  
20 июня 2022 г.