

Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова

**ЗОНДИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ НА
ОРБИТЕ КА «МЕТЕОР»**

А.В. ТЕРТЫШНИКОВ

Основания.

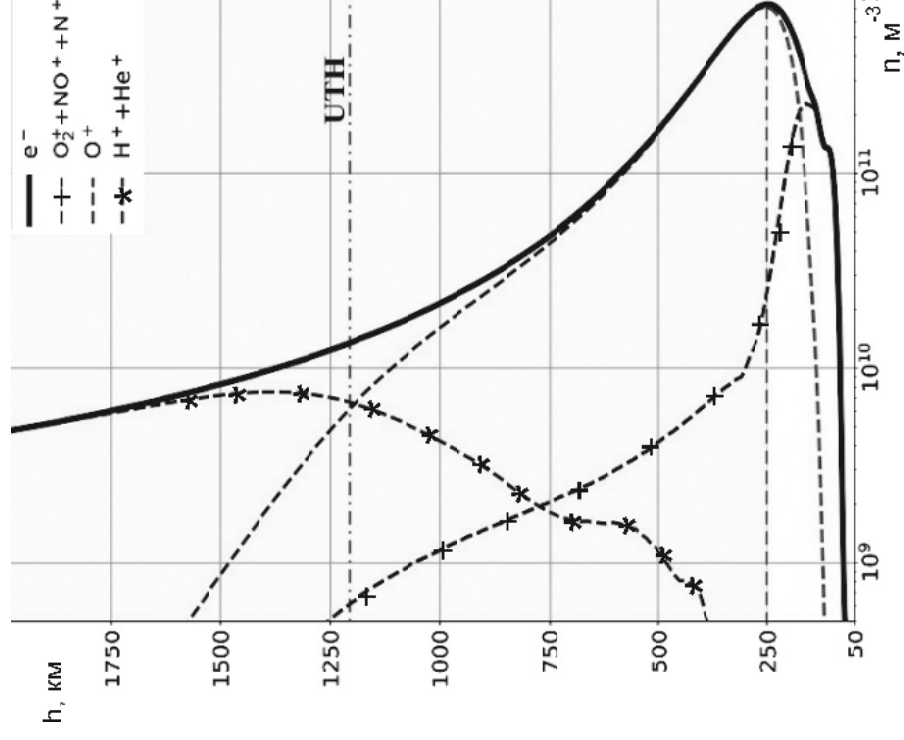
На графике показаны преобладающие ионы по высотам.

В диапазоне высот 300-800 км для высоких и средних широт основным ионом является O^+ . Уровень УТН показывает равенство процентного содержания O^+ процентному содержанию суммы $H^+ + He^+$.

Над экватором и тропиками выше 700 км надо учитывать H^+ и He^+ .

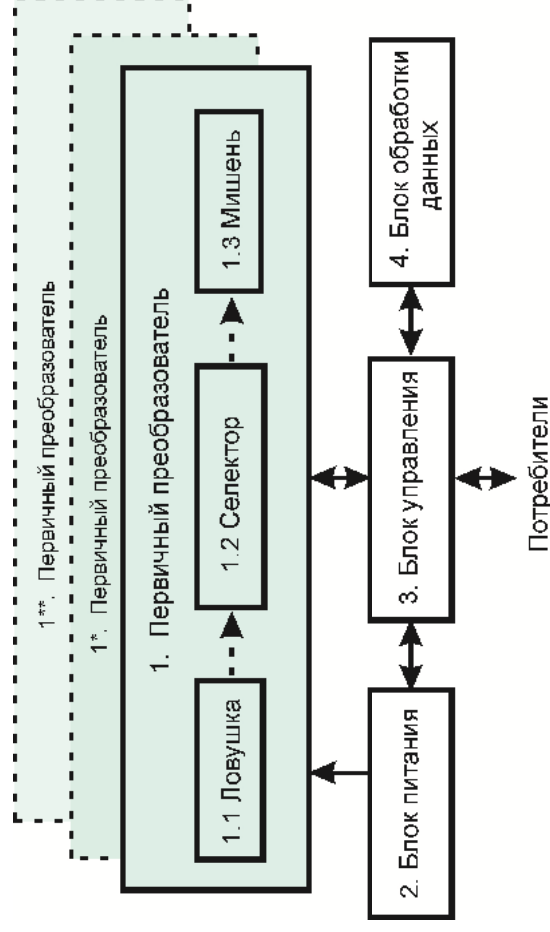
На основе регистрации указанных ионов построены схемы измерений в масс-спектрометре (прибор «IAP») на КА DEMETER и его аналоге – приборе «RAP» на China Seismo-Electromagnetic Satellite.

Эта идея была реализована для зондирования ионосферы масс-спектрометром на КА «МЕТЕОР» (архив 2010 -2022 г.г.).



Billita, D., Pezzopane, M., Truhlik, V., Altadill, D., Reinisch, B. W., & Pignalberi, A. (2022). The International Reference Ionosphere model: A review and description of an ionospheric benchmark. *Reviews of Geophysics*, 60, e2022RG000792. <https://doi.org/10.1029/2022RG000792>.

Схема составляющих ионозонда:



1, 1*...1** – первичные преобразователи, 2 – блок питания, 3 – блок управления, 4 – блок обработки данных, 1.1 – ловушка, 1.2 – селектор, 1.3 – мишень.

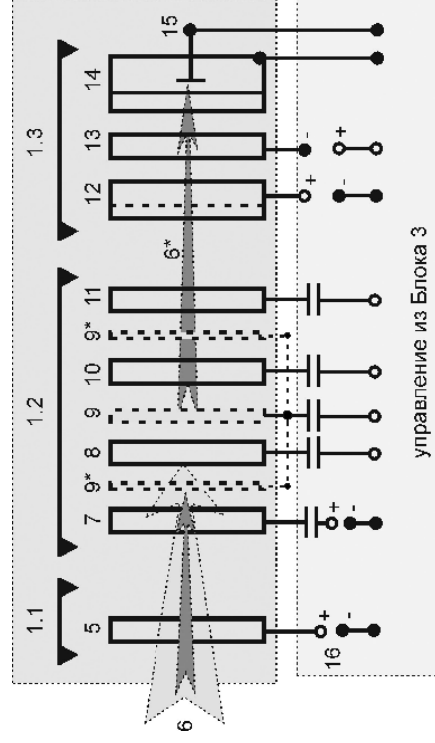
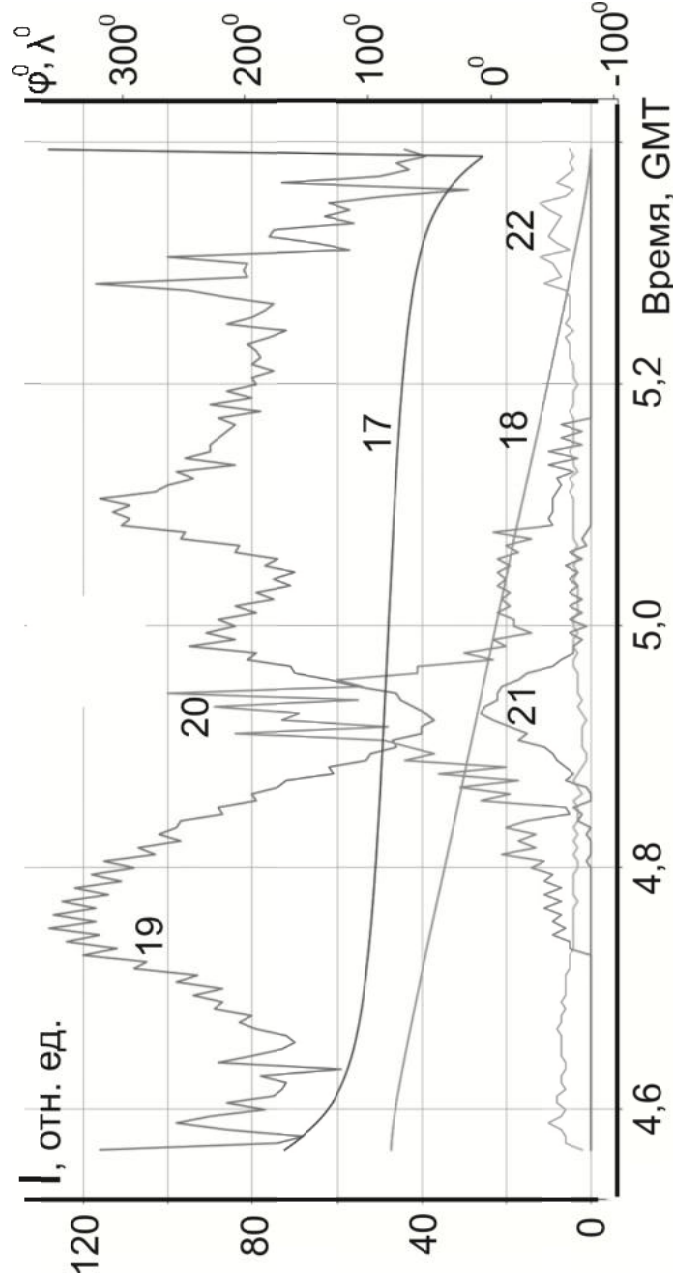


Схема первичного преобразователя: 5 – сетка ловушки входного отверстия, 6-6* – направление потока ионов, 7 – первая сетка селектирующего каскада, 8 – вторая сетка, 9 и 9* – цилиндры для сигналов от генератора высокой частоты, 10 – третья сетка, 11 – четвертая сетка селектирующего каскада, 12 – сетка задержки, 13 – антиэлектронная сетка, 14 – экран, 15 – мишень с коллектором-катодом, 16 – ключ.

Результаты зондирования ионов по катодному току макетом ионозонда на
утреннем полувитке КА «Метеор-2-2» 21.03.2021 г.: 17 – широта, 18 –
долгота, 19 – O+, 20 – He+, 21 – H+, 22 – N+.



Наибольшие коэффициенты корреляции с результатами моделирования
электронной концентрации не по модели SIMP-2 продемонстрировали
концентрации легких ионов: с атомными единицами массы 1 (H+, 0,52), 2
(H2+, 0,59, но этого иона мало) и 4 (He+, 0,64), особенно в тропических и
экваториальных широтах.

Регрессионные модели.

В диапазоне от 81,50 с.ш. до 540 градусов с.ш.:

$$n\text{eSIMP}2=1,1 (78[\text{IO}+]) - 149,1, \text{ См-3}$$

где IO+ – катодный ток в относительных единицах, множитель 78 – этот калибровочный коэффициент для пересчета в содержание иона O+ в См-3. Со стандартными значениями ошибок коэффициент 1,1 записывается в $1,1 \pm 0,27$, константа в $149,1 \pm 1771$. Коэффициент детерминированности 0,38. При его расчете сравниваются фактические значения $n\text{eSIMP}2$ и значения из уравнения прямой, затем нормируются от 0 до 1. Если он равен 1, то имеет место полная корреляция с моделью. Если коэффициент детерминированности равен 0, использовать уравнение регрессии для предсказания значений $n\text{eSIMP}2$ не имеет смысла. Оценка стандартной ошибки левой части уравнения равна 1303. Значение F-критерия равно 16,3 для 27 степеней свободы.

В диапазоне тропики-экватор (± 220 широты):

$n\text{eSIMP}2=1,5 \pm 1,1 (116[\text{He}+]) + 0,12 \pm 0,47 (116[\text{H}2+]) + 0,21 \pm 0,65 (116[\text{H}+]) + 14285 \pm 1022, \text{ См-3}$
с коэффициентом детерминированности 0,52 и стандартной ошибкой левой части 1882, что не превышает 20 % от оценок по модели SIMP-2.

Или

$n\text{eSIMP}2 \pm 1882 = 0,46 \pm 0,33 (116[\text{He}+]) + 0,16 \pm 0,56 (116[\text{H}2+]) + 14515 \pm 823, \text{ См-3}$
с коэффициентом детерминированности 0,48.

Или $n\text{eSIMP}2 \pm 2843 = 1 \pm 0,15 (116[\text{He}+]) + 10408 \pm 823, \text{ См-3}$.

с коэффициентом детерминированности 0,52. Значение F-критерия равно 42,2 для 38 степеней свободы.

Над экватором ± 50 широты:

$n\text{eSIMP}2 \pm 1627 = 0,48 \pm 0,57 (116[\text{H}+]) + 0,26 \pm 1,76 (116[\text{H}2+]) + 15804 \pm 1780, \text{ См-3}$

с коэффициентом детерминированности 0,48. Значение F-критерия равно 3,2 для 7 степеней свободы.

Или $n\text{eSIMP}2 \pm 1633 = 2,1 \pm 0,89 (116[\text{H}+]) + 16842 \pm 913, \text{ См-3}$

с коэффициентом детерминированности 0,44. Значение F-критерия для 7 степеней свободы увеличивается до 5,5.

Таким образом, в высоких и средних широтах на высотах 200-700 км для оценки электронной плотности могут быть использованы только измерения катодных токов по содержанию иона O+, над тропиками и экваториальной зонами выше 600 км могут быть использованы только измерения катодных токов по содержанию легких ионов с атомной массой 1 и 4, над экваториальными широтами измерения содержания иона H+. Выше 1300 км достаточно измерений содержания иона H+.

Коэффициенты перед переменными с катодными токами в моделях регрессии могут предварительно оцениваться и калиброваться по данным измерений на предыдущих витках, и по статистической ассимиляционной модели данных измерений. Суммарная концентрация указанных ионов фактически определяет концентрацию электронов.

Значительные вариации стандартных ошибок в приведенных уравнениях регрессии не представляются критичными, так ионосфера и верхняя ионосфера характеризуется высокой изменчивостью, что подтверждают оценки невозмущенной ионосферы в $\pm 50\%$ от концентрации электронов, а также результатами сравнения расчетных моделей электронной концентрации ионосферы **SIMP-2** с усовершенствованной **SIMP_{ус}**, а также **SIMP-2** с **IRI**.

Для модели SIMP_{ус} коэффициент при катодных токах для иона O⁺ в северном полушарии увеличивается почти на 50% до 126, а для **легких ионов в 5 раз**.

Различия между SIMP-2 с IRI в экваториальной зоне достигает 300 % и более.
Что подчеркивает необходимость регулярной калибровки измерений и корректировки моделей электронной плотности ионосферы и потенциальное внимание к результатам позиционирования по данным ГНСС в этих широтах.

Для решения задачи диагностики сверхтяжелых ионов техногенного происхождения в верхней атмосфере целесообразно настраивать ионозонд на их атомную массу, либо использовать функционирующие масс-спектрометры.

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ.

Зондирование концентраций основных (O^+ , Ne^+ и H^+) ионов в верхней ионосфере Земли позволяет оценить электронную плотность по орбите зондирования.

Предложено техническое решение для ионозонда на основе масс-спектрометрической селекции ионов в верхней атмосфере Земли.

Приведен пример зондирования ионосферы с макетом ионозонда и регрессионные модели расчета электронной плотности по измеренной концентрации ионов O^+ , Ne^+ и H^+ .

Ионозонд позволит повысить качество измерений характеристик ионосферы Земли.

Проблемные вопросы: а что с отрицательными ионами?

Можно адаптировать новый ионозонд под диагностику отрицательных ионов.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!!!

**ЗОНДИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ НА ОРБИТЕ
КА «МЕТЕОР»**

А.В. ТЕРТЫШНИКОВ