

О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ ДИСПЕРСИОННЫМ МЕТОДОМ ПРИ ПОМОЩИ ИСЗ И О НОВОМ МАКСИМУМЕ ИОНИЗАЦИИ В ИОНОСФЕРЕ

К. И. Грингауз, Ю. А. Кравцов, В. А. Рудаков, С. М. Рытов

В ряде работ Я. Л. Альперта [1—6] (некоторые из них написаны совместно с другими авторами) рассматривается вопрос об измерении локальной электронной концентрации в ионосфере дисперсионным методом при помощи ИСЗ. В последней из указанных работ сделан вывод о существовании ранее не известного максимума ионизации, достигающего 90—95% от максимума области F и расположенного на 120—140 км выше последнего. Этот вывод содержится также в [7 и 24]. В связи с указанными работами (особенно [6, 7]) мы хотели бы отметить следующее.

О возможности измерения локальной концентрации дисперсионным методом при помощи ИСЗ

1. Согласно [1—7], возможность измерения локальной концентрации N_c опирается на то, что в выражении для разности доплеровских смещений у двух сигналов когерентными частотами ω_1 и ω_2 члены, содержащие горизонтальные градиенты концентрации ($\partial N / \partial x$ и $\partial N / \partial y$), и нестационарный член (с $\partial N / \partial t$) малы по сравнению с членом, содержащим локальную концентрацию N_c . Указанное выражение [6, ф-ла (18)], область применимости которого мы здесь не обсуждаем, имеет вид

$$\delta\Phi = \frac{\omega_1}{c} \frac{2\pi c^2}{m} \left(\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_1^2} \right) \left\{ -\frac{N_c \dot{z}_c}{\cos \varphi_0} + \left([N_R] + \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right] \right) \times \right. \\ \left. \times \left(\dot{r}_c + \frac{\dot{z}_c}{\cos \varphi_0} \right) - \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right] \dot{y}_c - \int_0^{z_c} \frac{\partial N}{\partial t} dS \right\}, \quad (1)$$

где \dot{z}_c и \dot{y}_c — компоненты скорости ИСЗ вдоль осей z и y ; \dot{r}_c — радиальная компонента скорости; φ_0 — угол между вертикалью и лучом зрения; dS — элемент длины луча.

$$[N_R] = \frac{1}{z_c} \int_0^{z_c} N dz, \quad \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right] = \frac{1}{z_c \cos \varphi_0 \sin \varphi_0} \int_0^{z_c} \frac{\partial N}{\partial x} z dz, \quad \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right] = \frac{1}{z_c \cos \varphi_0} \int_0^{z_c} \frac{\partial N}{\partial y} z dz.$$

Для простоты здесь выписаны значения величин $[N_R]$, $[\partial N / \partial x]$, $[\partial N / \partial y]$ в приближении плоской ионосферы. Как сказано, предполагается, что члены $[\partial N / \partial y] \dot{y}_c$,

$[\partial N / \partial x] (\dot{r}_c + \dot{z}_c / \cos \varphi_0)$ и $\int_0^{z_c} (\partial N / \partial t) dS$ малы по сравнению с $N_c \dot{z}_c / \cos \varphi_0$.

В литературе уже высказывались сомнения по поводу справедливости такого пренебрежения. Так, в работе [8] отмечено, что при наличии регулярных горизонтальных градиентов, возникающих, например, при восходе и заходе Солнца, невозможно отличить их вклад в $\delta\Phi$ от вклада члена с N_c . В частности, в [8] приведен пример,

показывающий, что при ной скорости ИСЗ по

место) и при $\int_0^{z_c} (\partial N / \partial t) ds$ несколько раз. Использо-

$z_c \sim 400$ км и высоте N_c высоте горизонтальных же порядок имеет и ве

Существенно, что Солнца, возможны и д Так, согласно [9], по д

50° N) возможно изме

на расстояниях 500—8

$-1,0 \cdot 10^6$ см⁻³ и сред (см. Фиг. 1, где на кр

ентный член значител

Согласно измерен

≤ 100 см⁻³ км⁻¹, прич

ствие этого величина

$$\left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]$$

имеющие такой же Так, согласно данным где $a = 5,7 \cdot 10^5$ см³ км

Однако даже при ные члены оказываю ровского смещения δ члена $|a \dot{y}_c [\partial N / \partial y]|$ оказывается недогус рения градиентов ∂N ных станций, разнес точность, во-вторых, сферы, тогда как, с ионосферы, которая л 2. Сказанное выш нов касается также

ствительно, согласно

10⁹ см⁻² сек⁻¹, а по членом $N_c \dot{z}_c / \cos \varphi_0$ и имеем $N_c \dot{z}_c \sim 5 \cdot 10^9$

$\int_0^{z_c} (\partial N / \partial t) ds$, прове

станций, в полной м сти последнего мето

* В работах [11 ния электронов в ве денных [11, 13], на н данных дисперсион ракет [14], когда гор учитывать.

показывающий, что при $N_c \sim 10^5 \text{ см}^{-3}$, $|\dot{x}_c|/|\dot{z}_c| \sim 10$ (т. е. при малой вертикальной скорости ИСЗ по сравнению с горизонтальной, что практически всегда имеет место) и при $\int_0^{z_c} (\partial N / \partial x) dz \sim 10^5 \text{ см}^{-3}$ градиентный член превосходит член с $N_c z_c$ в несколько раз. Использованное в [8] значение величины $\int_0^{z_c} (\partial N / \partial x) dz \sim 10^5 \text{ см}^{-3}$ при $z_c \sim 400 \text{ км}$ и высоте максимума области F , равной 300 км , соответствует средним по высоте горизонтальным градиентам $(\partial N / \partial x)_{\text{ср}} \sim 5 \cdot 10^2 \text{ см}^{-2} \text{ км}^{-1}$. Разумеется, такой же порядок имеет и величина $(\partial N / \partial y)_{\text{ср}}$.

Существенно, что кроме градиентов, образующихся во время восхода и захода Солнца, возможны и другие, иногда значительно большие, горизонтальные градиенты. Так, согласно [9], по данным ИСЗ «Алуэт» (см. также [10]), в средних широтах ($40^\circ - 50^\circ \text{ N}$) возможно изменение интегральной концентрации $\Delta \int_0^{z_c} N dz \sim 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$

на расстояниях $500 - 800 \text{ км}$ [9], что соответствует величинам $\int_0^{z_c} (\partial N / \partial x) dz \sim (0,6 - 1,0) \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ и средним градиентам $(\partial N / \partial x)_{\text{ср}} \sim (\partial N / \partial y)_{\text{ср}} \sim (3 - 5) \cdot 10^3 \text{ см}^{-2} \text{ км}^{-1}$ (см. Фиг. 1, где на кривых указаны значения $N \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-3}$). При этих условиях градиентный член значительно превосходит член с N_c .

Согласно измерениям Я. Л. Альперта, максимальное значение $(\partial \bar{N} / \partial y)_{\text{max}} \leq 100 \text{ см}^{-3} \text{ км}^{-1}$, причем величина $\partial N / \partial y$ меняет знак на высотах $z \sim 200 \text{ км}$. Вследствие этого величина $\int_0^{z_c} (\partial N / \partial y) dz$ (а также значения

$$\left[\frac{\partial \bar{N}}{\partial x} \right] \leq \frac{1}{z_c} \int_0^{z_c} \frac{\partial N}{\partial x} z dz \quad \text{и} \quad \left[\frac{\partial \bar{N}}{\partial y} \right] \leq \frac{1}{z_c} \int_0^{z_c} \frac{\partial N}{\partial y} z dz,$$

имеющие такой же порядок величины) оказывается существенно меньше 10^5 см^{-3} . Так, согласно данным табл. 4 работы [6] при значениях $a[\partial \bar{N} / \partial y] \dot{y}_c \sim (1 - 10) \text{ сек}^{-1}$, где $a = 5,7 \cdot 10^5 \text{ см}^3 \text{ км}^{-1}$, и при $\dot{y}_c \sim 7 \text{ км сек}^{-1}$ имеем

$$[\partial \bar{N} / \partial y] \sim \int_0^{z_c} \frac{\partial N}{\partial y} dz \sim (0,25 - 2,5) \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}.$$

Однако даже при столь малых значениях $[\partial \bar{N} / \partial y]$ отбрасываемые в [6] градиентные члены оказываются сравнимыми с измеренным значением разностного доплеровского смещения $\delta\Phi$. Действительно, среднее значение отношения отбрасываемого члена $|a \dot{y}_c [\partial \bar{N} / \partial y]|$ к $|\delta\Phi|$ по 15 измерениям, приведенным в табл. 4, равно 0,8, т. е. оказывается недопустимо большим. Мы не говорим уже о том, что сам метод измерения градиентов $\partial N / \partial x$ и $\partial N / \partial y$, основанный на сравнении показаний ионосферных станций, разнесенных на сотни километров, во-первых, имеет очень невысокую точность, во-вторых, дает значения $\partial N / \partial x$ и $\partial N / \partial y$ только для нижней части ионосферы, тогда как, согласно [8], существенную роль играют градиенты в той части ионосферы, которая лежит выше максимума области F .

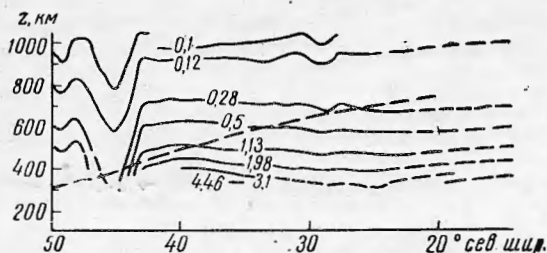
2. Сказанное выше относительно необоснованного отбрасывания градиентных членов касается также (хотя и в меньшей степени) нестационарного члена в (1). Действительно, согласно [11-13], величина $\int_0^{z_c} (\partial N / \partial t) dz$ достигает значений $\sim 10^8 -$

$10^9 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$, а по данным работы [14] — даже $5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-1} \text{ сек}^{-1}$, что вполне сравнимо с членом $N_c \dot{z}_c / \cos \varphi_0$ в формуле (1). Например, при $N_c \sim 10^5 \text{ см}^{-3}$ и $\dot{z}_c \sim 0,5 \text{ км сек}^{-1}$ имеем $N_c \dot{z}_c \sim 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$. Разумеется, к оценкам нестационарного члена

$\int_0^{z_c} (\partial N / \partial t) ds$, проведенным Я. Л. Альпертом на основе данных ионосферных станций, в полной мере относятся и сделанные выше замечания о небольшой точности последнего метода и отсутствии учета влияния верхних слоев ионосферы.

* В работах [11-14] проводились измерения вариаций интегрального содержания электронов в вертикальном столбе, основанные на радиоастрономических наблюдениях [11, 13], на наблюдениях эффекта Фарадея при радиолокации Луны [12] и на данных дисперсионного интерферометра при вертикальных запусках геофизических ракет [14], когда горизонтальное перемещение источников сигналов можно было не учитывать.

Важно подчеркнуть, что при измерениях N_c на высотах в несколько тысяч километров, где локальная концентрация мала, влияние временных изменений интегральной концентрации на $\delta\Phi$ еще более возрастает. Измерения же N_c дисперсионным методом на расстояниях порядка нескольких радиусов Земли, как это предлагает Я. Л. Альперт [4], вообще не могут претендовать на какую-либо надежность.



Фиг. 1

3. Совершенно не обоснована используемая в работе [6] методика осреднения записей $\delta\Phi$. Я. Л. Альперт предполагает, что «при таком осреднении сглаживаются быстрые пространственные и временные изменения ионосферных величин, обуславливающих вариации $\delta\Phi$ » (стр. 491), но тут же отмечает, что «это предположение требует, естественно, теоретического обоснования. Однако соответствующие вопросы будут рассмотрены в другой работе» (там же). Пока можно констатировать отсутствие единого мнения о причинах быстрых вариаций $\delta\Phi$. По мнению Я. Л. Альперта, «вариации $\delta\Phi$, типа изображенных на фиг. 5—7, обусловлены главным образом локальной изменчивостью электронной концентрации» (там же), что, разумеется, является прямым следствием предполагаемой малости градиентных и нестационарного члена в (1). Между тем, в работе [15], авторы которой выражают признательность Я. Л. Альперту «за помощь в организации эксперимента и за постоянный интерес к работе», утверждается нечто прямо противоположное: изучение вариаций $\delta\Phi$ дает возможность «выявить изменения во всей толще ионосферы ниже спутника» (курсив наш), что равносильно признанию малости члена с N_c по сравнению с градиентными членами.

4. В работе [6] вопрос о точности применяемого метода измерения N_c практически не рассматривается, что не позволяет судить о достоверности полученных результатов. Положение не исправляет и произведенное в табл. 3 сравнение измеренных дисперсионным методом значений N_c для случаев, когда спутник проходил ниже максимума области F , с данными ионосферных станций. Кроме того, что такое сравнение не вполне законно, поскольку ионосферные станции удалены от проекции орбиты спутника на сотни километров, следует отметить, что полученные двумя методами значения N_c заметно отличаются друг от друга, что вовсе не свидетельствует об «отсутствии больших погрешностей» [6, стр. 497]. По данным табл. 3 измерения дисперсионным методом и при помощи ионосферных станций дают для $N_c \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-3}$ следующие пары значений: 1,9 и 1,45; 2,3 и 1,2; 2,9 и 3,8; 2,7 и 2,6; 1,7 и 2,9 соответственно.

О существовании нового максимума ионизации

Если бы даже методика, используемая Я. Л. Альпертом, давала точные значения локальной концентрации вдоль орбиты, то и в этом случае полученные результаты не позволили бы построить детальный высотный ход $N(z)$, во-первых, из-за неодновременности наблюдений, во-вторых, — из-за проведения измерений N_c над различными географическими пунктами. Из табл. 3 и 5 работы [6] видно, что при построении приведенного на фиг. 13 высотного хода N_c/N_m (N_m — максимальная концентрация в области F) использовались значения N_c , измеренные в течение весьма значительного периода времени (23.III — 15.IV 1962 г.). Ясно, что заключение о существовании нового слоя могло быть достоверным только в том случае, если бы ионосфера оставалась неизменной в течение указанного трехнедельного срока, а форма профиля $N(z)$ была при этом одинакова над всеми пунктами, где пролетал спутник. Между тем из табл. 5 следует, что на протяжении трех недель отношение N_c/N_m на фиксированной высоте изменялось в широких пределах — по крайней мере в пять раз.

Вызывает возражения также то, что высотный ход N_c/N_m был построен по данным измерений над различными географическими пунктами, так как существенную роль при этом могут играть горизонтальные градиенты. На это обстоятельство уже обращалось внимание. Например, в работе [16] отмечено, что при измерении концентрации ионов N_i с помощью ловушек график N_i в зависимости от z не отображает высотного профиля $N_i(z)$ из-за наличия горизонтальных неоднородностей. Концентрация ионов (а тем самым и электронов) изменяется даже при строго горизонтальном (т. е. по круговой орбите) полете спутника.

В кач
ден «высо
ной на фл
роенный
спутника,
ности по
«Алуэта»,
ны нами
хода» на

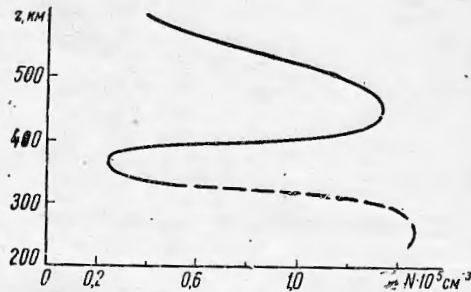
Эти я
результат
эль» [17],
вать непр
вания еш
ции. Заме
мое иногда
порой на
ние отраз
вому слов
слое F
«слоем G »
званы кру
станции, и
щих антен

Таким
концентра
щего на 1
мнению, с
нарные чл
оценена п
межутков
ному проф
не был об
деление N
(минуты
мерения в
рентного р

1. Я. Л. А.
2. Я. Л. А.
3. Я. Л. А.
1964, 4
4. Я. Л. А.
1963, 3
5. Я. Л. А.
6. Я. Л. А.
7. J. L. A.
radiow
rence,
8. H. A. M.
9. J. H. C.
ted the
10. O. C. E.
11. Дж. А.
12. J. V. E.
13. B. V. E.
1373.
14. K. I. I.
Изд-вс
15. B. A. M.
мия, 1
16. K. I. I.
ники E
17. J. S. a y
18. S. J. B

В качестве иллюстрации влияния горизонтальных градиентов на фиг. 2 приведен «высотный ход» $N(z)$, который был бы измерен на спутнике с орбитой, показанной на фиг. 1 пунктирной линией. Из фиг. 2 видно, что «высотный ход» $N(z)$, построенный по измерениям локальной концентрации вдоль предполагаемой орбиты спутника, имел бы максимум, лежащий выше максимума области F . В действительности по данным радиозондирования с «Алуэта», которые и были использованы нами при построении «высотного хода» на фиг. 2, такого максимума нет.

Эти же соображения относятся и к результатам, полученным на ИСЗ «Ариэль» [17], из которых также можно сделать неправильный вывод о существовании еще одного максимума ионизации. Заметим попутно, что высказываемое иногда мнение, будто наблюдаемые порой на ионосферных станциях дальние отражения следует приписать новому слою, видимо, сквозь просветы в слое F (его предлагали назвать «слоем G »), также нельзя считать обоснованным. Дальние отражения могут быть вызваны крупными неоднородностями ионосферы, лежащими в стороне от ионосферной станции, но попадающими в пределы широкой диаграммы направленности зондирующих антенн.



Фиг. 2

Таким образом, определяемые Я. Л. Альпертом значения локальной электронной концентрации и сделанный им вывод о существовании максимума ионизации, лежащего на 120—140 км выше максимума ионизации области F , не могут, по нашему мнению, считаться обоснованными, так как не были учтены градиентные и нестационарные члены в (1), не была доказана законность осреднения записей $\delta\Phi$ и не была оценена погрешность измерений. Кроме того, данные измерений за длительный промежуток времени и на разных витках спутника были сведены к одному вертикальному профилю $N(z)$. Нельзя не подчеркнуть также, что новый максимум ионизации не был обнаружен ни в одном из многочисленных экспериментов, в которых распределение $N(z)$ получается строго над одним пунктом за короткий промежуток времени (минуты или десятки минут). К таким экспериментам относятся разнообразные измерения во время вертикальных пусков ракет [18—20] и измерения методом некогерентного рассеяния радиоволн [21, 22] (см. также [23]).

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Л. Альперт. Успехи физ. наук, 1958, 64, № 1, 3.
2. Я. Л. Альперт. Успехи физ. наук, 1960, 71, № 3, 369.
3. Я. Л. Альперт, В. Б. Белянский, Н. А. Митяков. Геомагн. и аэрномия, 1964, 4, № 1, 3.
4. Я. Л. Альперт, В. Б. Белянский, А. Ф. Кутияков. Геомагн. и аэрномия, 1963, 3, № 1, 167.
5. Я. Л. Альперт. Геомагн. и аэрномия, 1963, 3, № 4, 626.
6. Я. Л. Альперт. Геомагн. и аэрномия, 1964, 4, № 3, 479.
7. J. L. Alpert. On the results of ionosphere investigations with the help on coherent radiowaves emitted by the satellites. Paper presented at COSPAR Symposium, Florence, 1964.
8. Н. А. Митяков, Э. Е. Митякова. Геомагн. и аэрномия, 1963, 3, № 5, 858.
9. J. H. Chapman. A survey of topside sounding of the ionosphere. Paper presented at the XIV General Assembly URSI, Tokyo, 1963.
10. O. C. Hauser, K. D. Baker, J. C. Ulwik. Proc. IEEE, 1964, 52, № 9, 1029.
11. Дж. А. Ратклифф. Физика ионосферы, ИЛ, 1960.
12. J. V. Evans. Proc. Phys. Soc., 1956, 69B, № 441, 953.
13. В. В. Виткевич, Ю. Л. Кокурин. Радиотехника и электроника, 1958, 3, № 1, 1373.
14. К. И. Грингауз, В. А. Рудаков. Сб. «Искусственные спутники Земли», № 6. Изд-во АН СССР, 1961, 48.
15. В. А. Мисюра, Г. К. Солодовников, В. М. Мигунов. Геомагн. и аэрномия, 1964, 4, № 6, 1124.
16. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, В. Д. Озеров. Сб. «Искусственные спутники Земли», № 6, Изд-во АН СССР, 1961, 63.
17. J. Sayers, P. Roithwell, J. H. Weger. Nature, 1962, 195, № 47, 1143.
18. S. J. Bauer, J. E. Jackson. J. Geophys. Res., 1961, 66, № 9, 3055.

19. S. J. Bauer, J. E. Jackson. J. Geophys. Res. 1962, 67, № 6, 1675.
20. R. E. Bourdeau. Space Sci. Rev. 1962, 1, 683.
21. K. L. Bowles. Space Res., III Symposium COSPAR, North. Holland, Amsterdam, 1963, 253.
22. K. L. Bowles. Incoherent backscatter from the ionosphere. Paper presented at XIV General Assembly of URSI, Tokyo, 1963.
23. Распределение электронной концентрации в ионосфере и экзосфере. Изд-во «Мир», 1964.
24. Я. Л. Альперт, В. М. Синельников. Геомагн. и аэрономия, 1965, 5, № 2, 209.

Радиотехнический институт
АН СССР

Статья поступила
4 февраля 1965 г.

Примечание при корректуре. После представления в редакцию нашей статьи была опубликована еще одна работа Я. Л. Альперта совместно с В. М. Синельниковым [24]. К ней в полной мере относятся все сделанные в нашей статье замечания. В частности, в [24], как и в [1—7], без всяких обоснований отбрасываются нестационарный и градиентный члены. Однако наличие максимумов ионизации выше основного максимума области F уже не рассматривается как единственно возможный результат наблюдений. В конце статьи обсуждается наряду с другими гипотезами возможность объяснения полученных результатов именно горизонтальными градиентами ионизации. Но рассуждения о знакопеременных горизонтальных градиентах могли бы быть верны, если бы высотные распределения строились по данным измерений за короткий промежуток времени.

Полученные прежним методом результаты называются в [24] уже не «высотным», а «высотно-временным» распределением электронной концентрации. Но и это название не отражает существа дела, так как значения N_c получены не только в разные дни и на различных высотах, но также и на различных широтах, долготах и азимутных расстояниях Солнца.