

ВАРИАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ И СКОРОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ В МЕЗОСФЕРЕ И НИЖНЕЙ ТЕРМОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ МЕТОДОМ ИПН В СРЕДНИХ ШИРОТАХ: НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Н.В. Бахметьева, Г.И. Григорьев, Е.Е. Калинина, И.Н. Жемяков, А.А. Лисов

Научно-исследовательский радиофизический институт

Нижегородского государственного университета, Нижний Новгород, Россия

E-mail: ilia.zhem@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований ионосферы Земли на высотах мезосфера и нижней термосфера методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях (ИПН) ионосферной плазмы во время захода и восхода Солнца. Обсуждается динамика высотного профиля и временных вариаций скорости вертикального движения плазмы на высотах 50–130 км. Получены высотные профили температуры нейтральной компоненты, проводится их сравнение с профилями, получаемыми с помощью радиометра SABER спутника TIMED.

Ключевые слова: ионосфера, плазма, искусственные периодические неоднородности, релаксация, заход, восход, температура, скорость вертикального движения, внутренние гравитационные волны, стенд СУРА.

VARIATIONS IN TEMPERATURE AND VELOCITY OF VERTICAL MOVEMENTS IN THE MESOSPHERE AND LOWER THERMOSPHERE ACCORDING TO MEASUREMENTS USING THE API TECHNIQUE IN THE MIDDLE LATITUDES: NEW RESULTS

N.V. Bakhmetieva, G.I. Grigoriev, E.E. Kalinina, I.N. Zhemyakov, A.A. Lisov

Abstract. The paper presents the results of experimental studies of the Earth's ionosphere at the heights of the mesosphere and the lower thermosphere using the method of resonant scattering of radio waves on artificial periodic irregularities (APIs) of the ionospheric plasma during sunset and sunrise. The dynamics of the altitude profile and time variations in the velocity of vertical plasma motion at altitudes of 50–130 km are discussed. The altitude profiles of the neutral component temperature are obtained and compared with the profiles derived using the SABER radiometer of the TIMED satellite.

Keywords: ionosphere, plasma, artificial periodic irregularities, relaxation, sunset, sunrise, temperature, vertical velocity, internal gravity waves, SURA facility.

Введение

Процессы, происходящие в нижней термосфере Земли, требуют особого внимания и изучения со стороны современной физики. Особый интерес представляют измерения в нестационарных условиях, к которым относится восходный и заходный периоды. В это время изменяется ионизация ионосферы и параметры нейтральной атмосферы, что влечет за собой изменение характеристик сигналов, рассеянных искусственными периодическими неоднородностями. В работе проведен анализ новых экспериментальных данных, полученных методом создания ИПН [1,2] во время захода и восхода Солнца в 2024 году. К ним относятся скорость вертикального движения плазмы и температура нейтральной атмосферы. Проведен сравнительный анализ профилей температуры на высотах 90–130 км, полученных методом ИПН и профилей с радиометром SABER спутника TIMED в одни и те же дни.

Скорость вертикального движения плазмы во время захода и восхода Солнца

В диапазоне высот 50–120 км плазма является пассивной примесью, которая переносится потоком нейтрального газа со скоростью нейтральной среды. Таким образом, измеренная по изменению фазы сигнала, рассеянного ИПН, скорость плазмы равна скорости нейтральной компоненты [3].

В сентябре 2024 года были проведены измерения методом ИПН в нестационарных условиях во время захода и восхода Солнца. Во время захода Солнца до 18:00 наблюдалась вариации скорости от –6 до +6 м/с и постоянная смена направления движения (рис. 1, левая

панель, отрицательные значения скорости соответствуют движению вверх). Наблюдались волновые вариации скорости с периодом от 15 минут до трех часов. Изменения вертикальной скорости во времени обусловлены волновыми процессами, включая внутренние гравитационные волны [4].

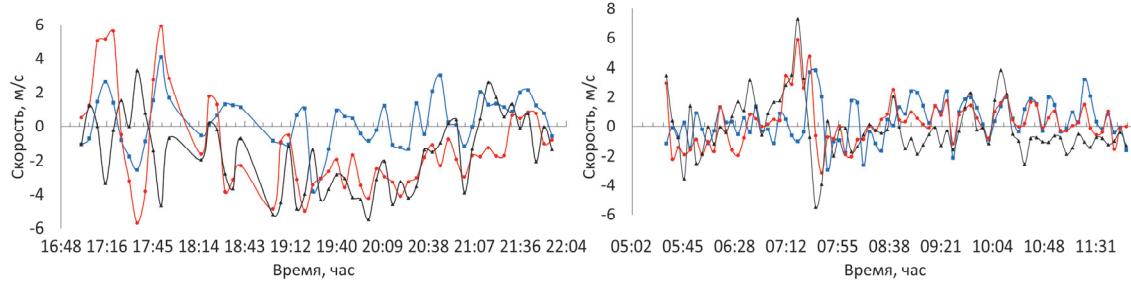


Рис. 1. Зависимость вертикальной скорости от времени на трех высотах Е-области 23–24 сентября 2024 года: 100 км (синие точки) 105 км (красные точки) и 112 км (черные точки) во время захода (левая панель) и восхода Солнца (правая панель)

После восхода Солнца (рис. 1, правая панель) вертикальная скорость изменилась от -4 до $+4$ м/с с увеличением до $-6/+8$ м/с при прохождении через пункт наблюдения терминатора (границы света и тени) около 07:00 LT. Отметим сравнительно высокую корреляцию временных вариаций скорости на высотах 105 км и 112 км (коэффициент корреляции равен 0,6) и более низкую корреляцию значений скорости на этих же высотах и скорости на высоте 100 км (коэффициент корреляции равен 0,26). В D-области при прохождении терминатора во время захода Солнца также наблюдалось увеличение размаха вариаций вертикальной скорости (рис. 2, левая панель), при этом во время восхода Солнца заметного увеличения скорости не отмечалось.

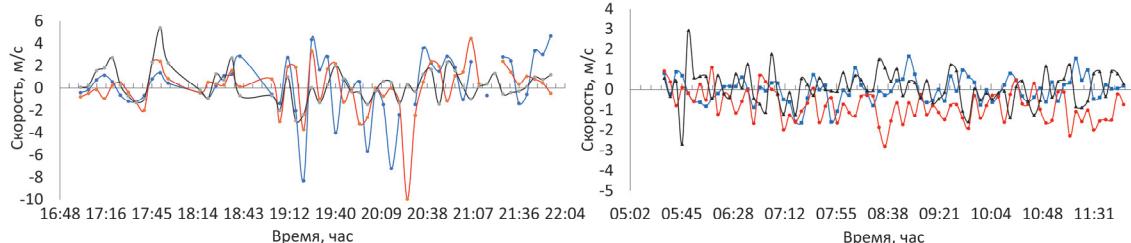


Рис. 2. Зависимость вертикальной скорости от времени на трех высотах D-области 23–24 сентября 2024 года: 68 км (синие точки), 77 км (красные точки) и 86 км (черные точки) во время захода (левая панель) и восхода (правая панель) Солнца

На рис. 3 представлена полная картина изменения вертикальной скорости на высотах 60–125 км в вечерние и утренние часы 23–24 сентября 2024 года. Отмечается разный характер изменений скорости с высотой и во времени в вечерние и утренние часы, особенно выше 100 км. В предзаходные часы на этих высотах наблюдались движения вверх с скоростью -8 м/с, сменившиеся затем близкими к нулю и положительными значениями 4–8 м/с (движения вниз).

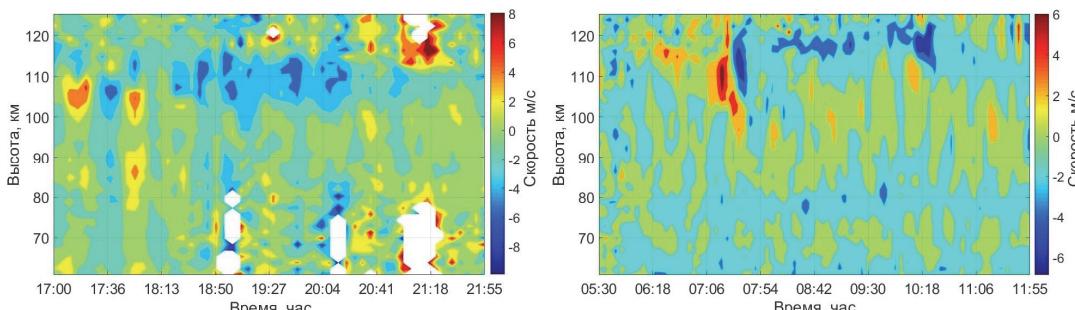


Рис. 3. Высотно-временные вариации вертикальной скорости 23–24 сентября 2024 года во время захода (левая панель) и восхода Солнца (правая панель)

Высотные профили и временные вариации температуры

Релаксация неоднородностей после окончания воздействия на ионосферу в интервале высот 90–130 км происходит под действием амбиполярной диффузии, при этом время релаксации обратно пропорционально температуре нейтральной компоненты [1,2]. Согласно методике [1, 2] с учетом условий [4] определялась температура нейтральной компоненты, как правило, в диапазоне высот 90–115 км. По результатам измерений времени релаксации ИПН получены высотные профили температуры разного вида: плавные профили без экстремумов, профили с выраженным минимумом и максимумом, а также профили с нерегулярным изменением температуры с высотой (рис. 4, правая панель). На левой панели рис. 4 показан высотный профиль скорости за это же время. Иногда наблюдалась корреляция профилей температуры и вертикальной скорости (рис. 4). Коэффициент корреляции приведенных на рис. 4 профилей равен 0,52 на высотах 95–104 км.

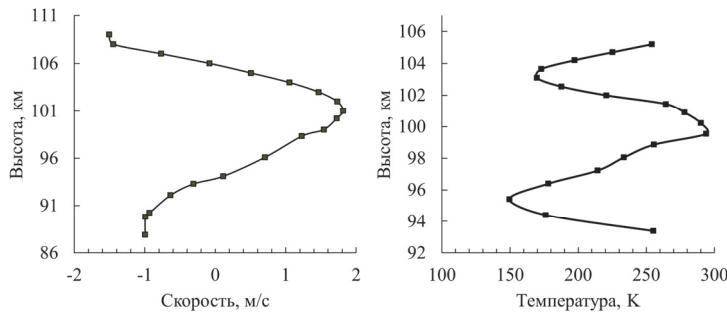


Рис. 4. Высотные профили скорости вертикального движения плазмы (левая панель) и температуры нейтральной атмосферы (правая панель), усредненные по интервалу времени 15 минут, в сеансе 10:40 24 сентября 2024 года

Одним из важнейших природных факторов, определяющих вариации температуры, являются атмосферные волны, распространяющиеся в мезосфере и нижней термосфере [5]. Для вариаций температуры (рис. 5) характерны периоды от 15 минут до 3-х часов, при этом температура изменялась от очень низких значений 60–70 К до 300 К. Отметим, что после восхода Солнца наблюдался постепенный рост температуры на 50–100 К.

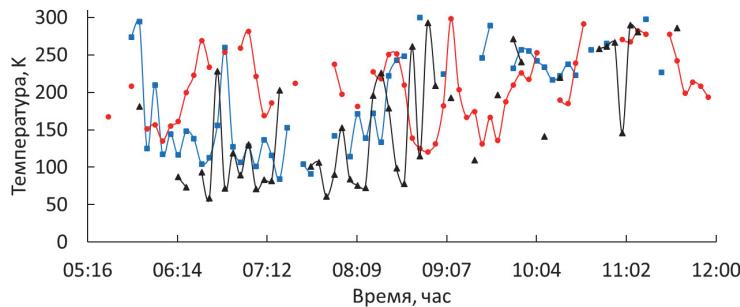


Рис. 5. Зависимость температуры от времени на трех высотах Е-области 24 сентября 2024 года: 100 км (синие точки), 105 км (красные точки) и 112 км (черные точки)

Температура по данным радиометра спутника TIMED

Проведено сравнение результатов измерения температуры методом ИПН и многоканальным радиометром SABER, установленным на борту спутника TIMED. Данный аппарат, запущенный NASA в 1980 году, предназначен для исследования земной ионосферы и совершает полный оборот вокруг Земли за 97 минут [6]. На рис. 6 представлены температурные профили, полученные на основе данных SABER и экспериментов, проведенных на стенде СУРА в 2024 году, в близкое время. Анализ полученных данных показывает, что ряд профилей имеет подобную высотную зависимость, тогда как другие находятся в «противофазе». При этом температурные расхождения между измерениями методом ИПН и радиометром SABER варьируются в пределах от 5 К до 60 К.

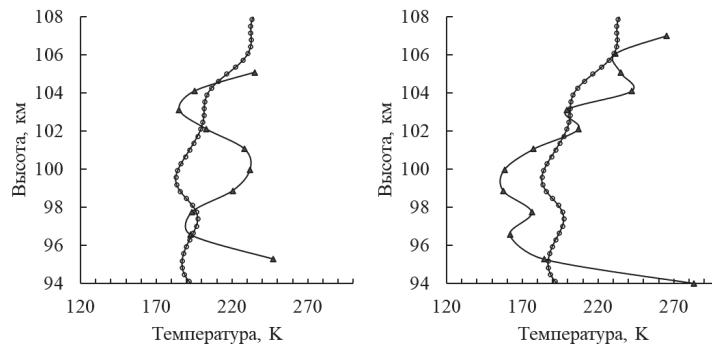


Рис. 6. Сравнение температуры, измеренной методом создания ИПН (треугольники) и спутниковых измерений SABER (кружки) за 25 сентября 2024 года 15:45 (левая панель) и 17:00 (правая панель)

Выводы

Анализ динамики нижней ионосферы по данным измерений скорости вертикального движения плазмы и температуры нейтральной компоненты, выполненных методом ИПН на стенде СУРА в нестационарных условиях в сентябре 2024 г., позволяет сформулировать следующие выводы.

- Вертикальная скорость имела переменное направление: её мгновенные значения изменялись в диапазоне от -10 м/с (движение вверх) до $+10$ м/с (движение вниз). Усреднённые за пятиминутные интервалы времени значения скорости обычно составляли от -4 до $+4$ м/с. Близкие по значениям результаты измерения вертикальной скорости разными методами представлены, например, в [7,8].

- Изменения вертикальной скорости имели волнообразный характер с периодами 15, 30 и 60 минут, типичными для внутренних гравитационных волн. При многочасовых наблюдениях регистрировались и долгопериодные колебания (период 2–3 часа). В диапазоне высот 60–125 км наблюдались быстрые вариации скорости по величине и направлению.

- В периоды восхода и захода Солнца высотные профили вертикальной скорости и температуры нейтральной компоненты коррелировали с коэффициентом корреляции более 0,4.

- Температурные профили, полученные методом ИПН и радиометром SABER спутника TIMED (близкие по широте и времени измерений), существенно различались в деталях, однако сохраняли общие черты в высотном распределении температуры.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда по проекту № 25–27–00031.

Список литературы

1. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Толмачева А.В., Бахметьева Н.В. Исследование ионосферы с помощью ИПН. – Н. Новгород: ИПФ РАН. 1999. – 156 с.
2. Belikovich V.V., Benediktov E.A., Tolmacheva A.V., Bakhmet'eva. N.V. Ionospheric Research by Means of Artificial Periodic Irregularities. – Copernicus GmbH. Katlenburg-Lindau, Germany, 2002. – 160 p.
3. Гершман Б. Н. Динамика ионосферной плазмы. – М.: Наука, 1974. – 256 с.
4. Fritts D.C., Alexander M.J. Gravity Wave Dynamics and Effects in the Middle Atmosphere // Rev. Geophys. – 2003. – Vol. 41. – № 3. – P. 1–64.
5. Бахметьева Н.В., Жемяков И.Н., Григорьев Г.И., Калинина Е.Е. Влияние природных факторов на температуру нижней термосферы // Химическая физика. – 2023. – Т. 42. – № 10. – С. 50–63.
6. Saber Database: official site. – URL: <https://saber.gats-inc.com/> (дата обращения: 10.02.2025).
7. Smith R.W. Vertical winds: A tutorial. // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. – 1998. – Vol. 60. – 1425–1434.
8. Hysell D.L., Rojas E. Modeling E-region artificial periodic inhomogeneity // Radio Science. – 2023. – Vol. 58, e2023RS007710. <https://doi.org/10.1029/2023RS007710>.