УДК 550.388.2

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ЧАСТИЧНЫХ ОТРАЖЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЗОСФЕРНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

© 2021 г. С. М. Черняков<sup>1,</sup> \*, В. А. Турянский<sup>1</sup>

 $^{1}\Phi$ едеральное государственное бюджетное научное учреждение Полярный геофизический институт,

Мурманск, Россия \*E-mail: smcherniakov@gmail.com Поступила в редакцию 25.09.2020 г. После доработки 20.10.2020 г.

Принята к публикации 27.11.2020 г.

Предложен радиофизический метод расчета мезосферной температуры, основанный на использовании экспериментальных измерений частот резонансных колебаний атмосферы: акустического обрезания и Бранта—Вяйсяля. По данным метода частичных отражений, получены температуры на высоте 75 км во время захода Солнца для дней, когда планетарный индекс геомагнитной активности Кр ≤ 1. Полученные значения температур согласуются с данными других исследователей.

DOI: 10.31857/S0367676521030078

### введение

Температура в мезосфере (высоты от 50 до 90 км) является одной из важнейших характеристик атмосферы, определяющей ее динамические и фотохимические процессы. К настоящему времени экспериментальные исследования и теоретический анализ распределения температуры в мезосфере выполнены в значительно меньшем объеме, чем для нижележащих областей атмосферы, поэтому является актуальным проведение мониторинговых наблюдений за составом и температурным режимом мезосферы, в частности, во время прохождения через нее атмосферных волн различных масштабов.

Развитие дистанционных методов зондирования атмосферы, основанных на измерении и интерпретации характеристик электромагнитного излучения после его взаимодействия с исследуемой средой, представляет значительный интерес. Из активных методов зондирования атмосферы наиболее современным и надежным является лазерное (лидарное) зондирование. При лидарном зондировании используется собственный монохроматический импульсный источник света, позволяющий проводить длительные непрерывные наблюдения с высоким пространственно-временным разрешением получаемых данных в произвольном направлении лазерного луча на различных высотах [1, 2].

Большое количество информации о температуре в атмосфере, в том числе в мезосфере получено на основе дистанционного зондирования с искусственных спутников Земли. Глобальная база данных температуры к настоящему времени получена с использованием 10-канального инфракрасного радиометра SABER (Sounding of the Atmosphere Using Broadband Emission Radiometry), расположенного на спутнике TIMED (Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics) [3], инфракрасного радиометра высокого разрешения HIRDLS (High-Resolution Dynamics Limb Sounder) на спутнике EOS (Earth Observing System) Aura [4], инфракрасного интерферометра для зондирования атмосферы IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) на спутнике MetOP (ESA) [5, 6] и др.

Спутниковые и ракетные методы имеют серьезные недостатки: эпизодические измерения, невозможность отслеживания небольших пространственно-временных вариаций и, наконец, большая стоимость. Радиофизические методы для получения информации о параметрах мезосферы являются всепогодными и могут работать тогда, когда измерения с помощью оптических наземных средств в большой степени ограничены прозрачностью приземного атмосферного слоя.

В данной работе предложен метод определения температуры нейтралов на мезосферных высотах на основе анализа измерений амплитуды отраженных от *D*-области сигналов радара частичных отражений.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В АТМОСФЕРЕ ПО ЕЕ РЕЗОНАНСНЫМ ЧАСТОТАМ

Теория акустико-гравитационных волн в атмосфере дает возможность описать многие из волноподобных колебаний в атмосфере [7]. В случае

$$\omega_{bv}^2 = (\gamma - 1) g^2 / c^2$$

плоско-стратифицированной и изотермической

атмосферы согласно теории акустико-гравитаци-

онных волн в атмосфере для атмосферных волн су-

ществуют две частотные области, где они могут

распространяться как акустические и гравитаци-

онные волны. Эти области ограничены резонанс-

ными частотами атмосферы: частотой акустиче-

ского обрезания  $\omega_{ac}$  (или периодом  $\tau_{ac}$ ) и частотой

Бранта-Вяйсяля  $\omega_{bv}$  (или периодом  $\tau_{bv}$ ). Частоту

 $\omega_{ac} = \gamma g/2c$ ,

где  $\gamma$  — показатель адиабаты, g — ускорение свобод-

ного падения, с – скорость звука. Частоту Бранта-

Вяйсяля определяют как частоту плавучести, с

которой вертикально смещенный объем атмосфер-

ного воздуха будет колебаться вблизи своего равно-

весного состояния в статически постоянной среде

(состояние гидростатического равновесия). В этом

случае возвращающей силой является не просто

сила сжатия, как в случае акустических волн, а

выталкивающая сила Архимеда – разность между

силами тяжести и градиента давления [8]. Эту ча-

стоту можно записать как

акустического обрезания определяют как:

По формулам резонансных частот из теории АГВ с использованием значений атмосферных параметров из эмпирической модели нейтральной атмосферы NRLMSISE-00 можно определить диапазон возможных частот атмосферных резонансов в различных гелиогеофизических условиях.

Затем, в результате спектрального анализа временного ряда экспериментальных значений какого-либо параметра атмосферы на выбранной высоте получаем реальный спектр вариаций этого параметра для выбранного частотного диапазона. После идентификации резонансов производится расчет температуры на данной высоте из выражений для колебаний, соответствующих атмосферным резонансным периодам акустического обрезания и Бранта—Вяйсяля:

$$\tau_{ac} = 2\pi \sqrt{\frac{4kT}{\gamma M m_{\rm H} g^2}}, \ \tau_{bv} = 2\pi \sqrt{\frac{\gamma kT}{(\gamma - 1)M m_{\rm H} g^2}},$$

где  $\gamma = C_p/C_v$  – отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме, k – постоянная Больцмана, T – нейтральная температу-

ра,  $M = \frac{m}{\Sigma(m_i/M_i)}$ , m – масса воздушной смеси,  $m_i$  –

масса *i*-го компонента,  $M_i$  — отношение массы *i*-го компонента к атомной единице массы,  $m_{\rm H}$  — масса атома водорода, g — ускорение свободного падения.

Особенностью метода частичных отражений, рассмотренного в следующем разделе, является возможность определять резонансные спектраль-

ные компоненты АГВ на высотах, от которых происходит отражение и модуляция волны радара. Таким образом, метод частичных отражений позволяет вычислять профиль нейтральной температуры на высотах зондирования. Достоинством при этом является то, что данные можно получать вне зависимости от погодных условий в атмосфере и времени суток.

#### МЕТОД И УСТАНОВКА ЧАСТИЧНЫХ ОТРАЖЕНИЙ ПОЛЯРНОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Эффективный метод исследования *D*-области ионосферы был предложен в 1950-х гг. Гарднером и Поси [9]. Дальнейшее развитие этот метод получил в последующих работах [10, 11]. Он представляет собой радиолокационное зондирование нижней ионосферы в диапазоне средних волн. Метод относительно прост в реализации и позволяет получать сведения об электронной плотности и параметрах неоднородностей на высотах нижней ионосферы.

В основе метода частичных отражений лежат излучение двух волновых мод (обыкновенной и необыкновенной волн) в виде чередующихся импульсов или линейно поляризованной волны на частотах в диапазоне от 2 до 8 МГц и обратное рассеяние радиоволн неоднородностями плазмы [12]. В первом случае производятся раздельный прием сигналов, частично рассеянных ионосферными неоднородностями, и измерение их амплитуд в зависимости от времени запаздывания, определяющего высоту отражения. Во втором случае принимаются две ортогональные линейные поляризации, из которых путем сложения со сдвигом фаз ±90° формируются сигналы двух круговых компонент. Для определения электронной плотности используется отношение измеренных амплитуд или разность поглощения вдоль траекторий распространения обыкновенной и необыкновенной радиоволн (метод дифференциального поглощения), либо прямые или косвенные измерения фазы (метод дифференциальной фазы и корреляционный метод). Измерения фазы обычно сложнее, чем измерения амплитуды, поэтому на практике наиболее широкое применение получил метод дифференциального поглощения. Таким образом, имеется возможность регистрации вариаций частично отраженных радиосигналов на выбранной высоте и выделения в них колебаний среды, вызванных различными источниками как естественного, так и искусственного происхождения.

Установка частичных отражений Полярного геофизического института для исследования нижней ионосферы состоит из передатчика, приемника, приемно-передающей фазированной решетки и автоматизированной системы сбора дан-



**Рис. 1.** Спектральная плотность мощности частично отраженной обыкновенной волны 27 февраля 2015 г. во время захода Солнца в 16:17:48 UT на высоте 75 км.

ных. Она расположена на радиофизическом полигоне (р. ф. п.) "Туманный" (69.0° с.ш., 35.7° в.д.). Основные параметры и методика обработки сигналов приведены в работе [13]. Технические характеристики радиолокатора: рабочие частоты 2.60-2.72 МГц; мощность передатчика в импульсе около 60 кВт; длительность импульса 15 мкс; частота зондирования 2 Гц. Амплитуда частично отраженной обыкновенной волны измеряется в милливольтах. Антенная решетка состоит из 38 пар скрещенных диполей, занимает площадь 10<sup>5</sup> м<sup>2</sup> и имеет ширину диаграммы направленности по уровню половинной мощности около 20°. Поочередно принимаются две круговые поляризации, которые усиливаются приемником прямого усиления с полосой 40 кГц. Обзорный диапазон высот 30-240 км. Шаг снятия данных по высоте  $h = 0.5 \cdot n$  км, где n = 1, 2, 3, ...

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Возможность выделения из спектра колебаний частично отраженного сигнала резонансных частот атмосферы зависит от волновой активности в атмосфере. Для того чтобы иметь во время измерений максимальную вероятность генерации (или усиления) в исследуемой области высот колебательных процессов, мы использовали радарные данные при прохождении солнечного терминатора через зенит станции.

Основная идея, что движущийся солнечный терминатор генерирует волновые процессы, была сформирована Биаром [14]. Он предположил, что существует много общего между процессами, которые развиваются при сверхзвуковом движении лунной тени во время солнечного затмения и сверхзвуковым движением солнечного терминатора. Первые экспериментальные подтверждения этого утверждения были опубликованы в работах [15, 16]. Теоретические основы этого явления рассмотрены Сомсиковым [17]. Т.о., солнечный терминатор является регулярным источником естественных волнообразных возмущений в атмосфере, которые могут усиливать собственные частоты в атмосфере: частоту акустического обрезания и частоту Бранта—Вяйсяля.

Для обработки использовались данные измерений амплитуды частично отраженной обыкновенной волны, из которых затем рассчитывалась спектральная плотность мощности вариаций амплитуды. Периоды атмосферных резонансов в *D*-области ионосферы лежат в области приблизительно от 4 до 6 мин [18], то для фильтрации вариаций амплитуды был взят цифровой полосовой эллиптический фильтр (фильтр Кауэра) пакета прикладных программ языка программирования MathLab с полосой пропускания от 2 до 8 мин. Особенностью этого эллиптического фильтра является крутой спад амплитудной характеристики, что позволяет добиваться более эффективного разделения частот, чем при использовании других линейных фильтров.

Для исследования спектральных характеристик и расчета нейтральной температуры на разных высотах нами были использованы временные ряды амплитуд частично отраженной обыкновенной волны в высотном интервале от 60 до 90 км во время прохождение солнечного терминатора при заходе Солнца. Для рассмотрения амплитудных спектров были выбраны спокойные в геомагнитном отношении дни, когда трехчасовой планетарный индекс геомагнитной активности Кр был меньше или равен единице и в атмосфере отсутствовали какие-либо иные возмущения.

Для расчета спектров использовались секундные данные двухчасового интервала амплитуды частично отраженной обыкновенной волны, включающего час до и час после прохождения солнечного терминатора во время захода над пунктом наблюдения. Из временного ряда амплитуды частично отраженной обыкновенной волны на высоте 75 км рассчитывались спектры временных вариаций амплитуды. По экспериментальным спектрам амплитуды идентифицировались, на основе теории АГВ и эмпирической модели атмосферы NRLMSISE-00, спектральные компоненты, соответствующие атмосферным резонансам, и рассчитывалась нейтральная температура на высотах мезосферы.

На рис. 1 показан пример зависимости спектральной плотности мощности (СПМ) вариаций амплитуды частично отраженной обыкновенной волны на высоте 75 км во время захода Солнца 27 февраля 2015 г. в 16:17:48 UT от периода колебания  $\tau$ . Для расчета был выбран двухчасовой период от 15:17 UT до 17:17 UT. Для других рассмотренных дней также брался двухчасовой период с временем захода на высоте 75 км в качестве середины периода. Спектральные максимумы, для которых периоды  $\tau < \tau_{ac}$  и  $\tau > \tau_{by}$ , могут принадле-



Рис. 2. Зависимость вариаций отфильтрованной амплитуды частично отраженной обыкновенной волны  $\Delta A_0$  на высоте 75 км во время захода Солнца зимой и весной: 1 - 20.01.2015 г., 2 - 27.02.2015 г., 3 - 07.04.2015 г., 4 - 26.04.2015 г.



Рис. 3. Зависимость вариаций отфильтрованной амплитуды частично отраженной обыкновенной волны  $\Delta A_0$  на высоте 75 км во время захода Солнца осенью и зимой: 1 - 26.10.2015 г., 2 - 21.11.2015 г., 3 - 22.11.2015 г., 4 - 23.11.2015 г., 5 - 03.12.2015 г., 6 - 16.12.2015 г.



**Рис. 4.** Температура на высоте 75 км для различных сезонов 2015 г. в зависимости от дня года *D*.

жать к акустическим модам (инфразвук) и к гравитационным модам, соответственно.

На рис. 2, 3 показаны примеры вариации  $\Delta A_{0}$  отфильтрованной амплитуды отраженной обыкновенной волны на высоте 75 км при прохожде-

ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ том 85 № 3 2021

нии солнечного терминатора во время захода Солнца. Вертикальными пунктирными линиями отмечено время захода на высоте 75 км. Среднее значение вариаций отфильтрованной амплитуды частично отраженной обыкновенной волны для всех рассмотренных случаев равно нулю, но для того, чтобы можно было сравнить поведение этих вариаций в разное время и в разные даты, графики вариаций амплитуд смещены по вертикали относительно друг друга. Из рис. 2 и 3 видно, что на высоте 75 км при прохождении солнечного терминатора проявляется волновая активность, что может приводить к усилению резонансных частот.

На рис. 4 представлен график значений нейтральной температуры на высоте 75 км, рассчитанных из экспериментальных данных  $\tau_{ac}$  и  $\tau_{bv}$  по формулам (1) для дней года *D*, которые приведены на рис. 2 и 3. При расчете использовались стандартные величины, типичные для нейтральной атмосферы. Заметно сезонное поведение температуры на высоте 75 км: уменьшение ее от 235 К в январе до 210 К в апреле и, наоборот, увеличение от 210 К в октябре до 270 К в декабре.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты анализа данных частичных отражений показали возможность использования спектров плотности мощности частично отраженной обыкновенной волны для идентификации и определения резонансных периодов волн в атмосфере на высотах мезосферы, а также возможность вычисления нейтральной температуры в *D*-области ионосферы по этим данным. Для места наблюдения (69.0° с.ш., 35.7° в.д.) получено сезонное изменение нейтральной температуры на высоте 75 км: уменьшение ее от ~235 K в январе до ~210 K в апреле и, увеличение от ~210 K в октябре до ~270 K в декабре.

В принципе, использованная нами методика определения температуры нейтралов может быть применена при анализе любых экспериментальных данных в виде временных рядов, содержащих информацию о вариациях атмосферных параметров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Bazhenov O.E., Burlakov V.D., Grishaev M.V. et al. // EPJ Web Conf. 2016. V. 119. Art. No. 24009.
- 2. *Маричев В.Н., Бочковский Д.А.* // Вестн. КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2017. № 4(20). С. 57.
- 3. http://www.timed.jhuapl.edu/WWW/index.php.
- 4. https://aura.gsfc.nasa.gov/hirdls.html.
- August T., Klaes D., Schlüssel P. et al. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2012. V. 113. No. 11. P. 1340.
- 6. https://eoportal.eumetsat.int/.
- 7. Hines C.O. // Geophys. Monogr. Ser. 1974. V. 18. P. 248.

- 8. Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере. М.: Мир, 1978. 532 с.
- Gardner F.F., Pawsey J.L. // J. Atm. Terr. Phys. 1953.
  V. 3. No. 6. P. 321.
- Belrose J.S., Burke M.J. // J. Geophys. Res. 1964. V. 69. No. 1. P. 2799.
- Coyne T.N., Belrose J.S. // Radio Sci. 1972. V. 7. No. 1. P. 163.
- Беликович В.В., Вяхирев В.Д., Калинина Е.Е. // Геомагн. и аэроном. 2004. Т. 44. № 2. С. 189. Belikovich V.V., Vyakhirev V.D., Kalinina E.E. // Geomagn. Aeron. 2004. V. 44. No. 2. Р. 170.
- 13. Терещенко В.Д., Васильев Е.Б., Овчинников Н.А., Попов А.А. Техника и методика геофизического эксперимента. Апатиты: КНЦ РАН, 2003. С. 37.
- 14. Beer T. // Nature. 1973. V. 242. No. 5392. P. 34.
- Herron T.J., Donn W.L. // J. Atm. Terr. Phys. 1973. V. 35. P. 2163.
- 16. *Rees D., Roper R.G., Lloyd K.H., Low C.H.* // Phil. Trans. Roy. Soc. A. 1972. V. A271. No. 121. P. 631.
- 17. *Сомсиков В.М.* // Геомагн. и аэроном. 2011. Т. 51. № 6. С. 723; *Somsikov V.M.* // Geomagn. Aeron. 2011. V. 51. No. 6. Р. 707.
- Knížová P.K., Mošna Z. Acoustic waves. From microdevices to helioseismology. InTech, 2011. P. 303.

## Use of the partial reflection method for determining the mesospheric temperature

S. M. Cherniakov<sup>*a*, \*</sup>, V. A. Turyansky<sup>*a*</sup>

<sup>a</sup>Polar Geophysical Institute, Murmansk, 183010 Russia \*e-mail: smcherniakov@gmail.com

A radiophysical method is proposed for obtaining the mesospheric temperature based on the use of experimental measurements of the frequencies of resonant atmospheric oscillations: acoustic cutoff frequency and the Brant–Väisälä's frequency. According to the partial reflection method, temperatures were obtained at the altitude of 75 km during sunset for days when the planetary index of geomagnetic activity was  $\leq 1$ . The obtained temperatures are consistent with data of other researchers.