

ЛИДАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ЯКУТИИ

С.В. Титов, С.В. Николашкин

Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия
stitov@ikfia.ysn.ru, nikolashkins@ikfia.ysn.ru

LIDAR INVESTIGATIONS OF ATMOSPHERIC WAVE PERTURBATIONS IN YAKUTIA

S.V. Titov, S.V. Nikolashkin

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia
stitov@ikfia.ysn.ru, nikolashkins@ikfia.ysn.ru

Аннотация. Начиная с 2004 г. проводятся лидарные измерения температуры атмосферы на высотах от 20 до 60 км на полигонах Института космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН: на полигоне «ШАЛ» с 2004 по 2017 г. и на оптическом полигоне «Маймага» с 2018 г. по сей день. Рассматриваются результаты, полученные с конца августа до середины мая, поскольку в летнее время на данной широте наступают белые ночи. Температурные профили атмосферы измеряются с временным и вертикальным разрешением 10–20 мин и 0.05–0.1 км соответственно. Внутренние гравитационные волны (ВГВ) наблюдаются во всех сеансах зондирования. Наблюдаемые ВГВ покрывают весь диапазон зондирования 20–60 км, стоит отметить, что основное изменение длины волны ВГВ происходит на высоте стратопазы во время зимних внезапных стратосферных потеплений (ВСП). В отдельные ночи преобладают несколько ВГВ с длинами волн 2–4, 5–7 и 10–15 км. Амплитуды волн обычно увеличиваются с высотой. Локальные флуктуационные минимумы часто наблюдаются на высотах стратопазы во время ВСП.

Ключевые слова: лидар, внутренние гравитационные волны, зимние внезапные стратосферные потепления.

Abstract. Since 2004, lidar measurements of temperature at heights from 20 to 60 km have been carried out at the test sites of the Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (at the EAS test site from 2004 to 2017 and at the Maymaga optical test site from 2018 until now). This paper presents the results only from the end of August to the middle of May because of the midnight sun occurring at our latitudes in summer. Atmospheric temperature profiles are measured with a temporal and vertical resolution of 10–20 min and 0.05–0.1 km, respectively. Internal gravity waves (IGWs) occur in all sounding sessions. The observed IGWs cover the entire sounding range from 20 to 60 km. Note that the main change in the IGW wavelength occurs at the stratopause height during winter sudden stratospheric warmings (SSWs). On some nights, several IGWs prevail with wavelengths of 2–4 km, 5–7 km, and 10–12 km. Wave amplitudes usually increase with height. Local fluctuation minima are often observed at stratopause heights during SSWs.

Keywords: lidar, internal gravity waves, winter sudden stratospheric warming.

ВВЕДЕНИЕ

На всех высотах атмосферы волновые движения являются важной составляющей динамических процессов. Атмосферные волны вносят существенный вклад в общий энергетический баланс среды путем передачи и переноса энергии и импульса между слоями атмосферы. Атмосферные внутренние гравитационные волны (ВГВ) генерируются различными тропосферными источниками, такими как фронты циклонических образований, струйные течения и конвекция, наряду с этим они также генерируются при землетрясениях, извержениях вулканов и ядерных взрывах. ВГВ играют важную роль в определении пространственно-временной структуры ветра и температуры средней атмосферы, передавая импульс и энергию на большие высоты [Labitze, 1981]. Амплитуды ВГВ по мере их распространения на большие высоты увеличиваются из-за уменьшения плотности атмосферы, поэтому их наблюдения начались в верхних слоях атмосферы. На высотах средней атмосферы ВГВ подвергаются спектральной фильтрации из-за ветрового сдвига и поглощаются, вызывая в области поглощения увеличение температуры. В настоящее время именно с этим свойством ВГВ связывают внезапные стратосферные потепления в зимний период. Все эти обстоятельства влияют на структуру и динамику нейтральной и ионизированной атмосферы [Шефов и др., 2006].

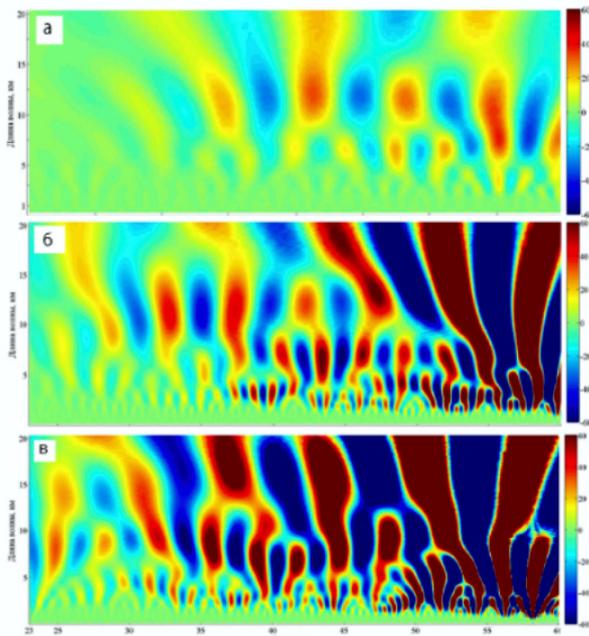
Основные исследования ВГВ в атмосфере были сконцентрированы на высотах ионосферы. Из-за силь-

ного уменьшения плотности земной атмосферы с высотой эти волны, по мере распространения вверх, усиливаются и приводят к значительным возмущениям ионосферы, благодаря чему ВГВ на этих высотах проще всего регистрировать. Однако до сих пор существовало лишь несколько методов, позволяющих наблюдать гравитационные волны с малыми вертикальными и горизонтальными масштабами. Лидар является единственным методом, позволяющим проводить постоянные наблюдения за средне- и низкочастотными ВГВ с соответствующим временным и высотным разрешением. Кроме того, лидарный метод недорогой, чего нельзя сказать про спутниковые и ракетные методы.

В этой статье будут рассмотрены измеренные лидарным методом флуктуации температурного профиля атмосферы, связанные с прохождением ВГВ.

МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Лидар (Light Detection and Ranging) — инструмент для лазерного зондирования, по принципиальному устройству лидар аналогичен радару. Атмосферные лидары — это инструменты, которые используют лазерный свет для изучения атмосферы: атмосферных газов, аэрозолей, облаков и температуры. В работе использованы данные рэлеевского лидара, который с 2004 по 2017 г. располагался на 60 км южнее Якутска на полигоне «ШАЛ» ИКФИА



Пример вейвлет-преобразования вариаций температурного профиля до и после ВСП (а), во время ВСП (б) и во время обращения среднего зонального ветра (в)

(61.66° N, 129.37° E), а с 2018 г. по настоящее время находится в 115 км к северу от Якутска на оптическом полигоне «Маймага» (63.06° N, 129.55° E).

Для определения вертикальных характеристик ВГВ использовалось непрерывное вейвлет-преобразование на основе вейвлета Морле [Werner et al., 2007]. Флуктуации профиля температуры, связанные с ВГВ, были получены сглаживанием температурного профиля атмосферы скользящим окном 2 км для ВЧ-фильтрации и вычитанием средненочного профиля температуры для НЧ-фильтрации.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Примеры расчетов представлены в виде поверхности в декартовой системе координат, где по оси X представлена высота в км, по оси Y — длина волны в км и по оси Z — амплитуда вейвлет-коэффициента (см. рисунок). Из графиков для зимних периодов с 2004 по 2017 г. были выявлены основные ВГВ с вертикальными длинами волн 2–4 км, 5–7 км и 10–15 км, их амплитуды возрастают с повышением высоты, а длины волн претерпевают незначительное увеличение из-за уменьшения плотности атмосферы. ВГВ наблюдаются весь зимний период. Амплитуды ВГВ резко возрастают во время ВСП во всем диапазоне высот (панель б), что соответствует опусканию высоты стратоспаузы и, как следствие, критического уровня [Matsuno, 1971]. В момент обращения среднего зонального ветра наблюдается диссипация всех доминирующих ВГВ на образовавшемся критическом слое, в некоторых случаях наблюдается фильтрация и генерация ВГВ выше критического слоя (панель в), что, по-видимому, связано с положением струйного течения над пунктом зондирования. Активность стратосферных гравитационных волн сильно коррелирует с приземными ветрами [Yoshiki, Sato,

2000]. Сочетание наблюдательных и численных данных и применение различных методов анализа свидетельствуют о наличии источника возбуждения гравитационных волн выше критического слоя, спорадически возникающего при взаимодействии полярного вихря с планетарными волнами, например, во время ВСП [Dörnbrack et al., 2018].

Полученные данные требуют дальнейшего подробного анализа с привлечением данных комплекса приборов для измерения плотности, температуры и скорости ветра во всем диапазоне высот атмосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. *Излучение атмосферы — индикатор ее структуры и динамики*. М.: Геос, 2006. 741 с.
- Dörnbrack A., Gisinger S., Kaifler N., et al. Gravity waves excited during a minor sudden stratospheric warming. *Atmos. Chem. Phys.* 2018. Vol. 18. P. 12915–12931. DOI: [10.5194/acp-18-12915-2018](https://doi.org/10.5194/acp-18-12915-2018).
- Labitzke K. Stratospheric-mesospheric midwinter disturbances: A summary of observed characteristics. *J. Geophys. Res.* 1981. Vol. 86. P. 9665–9678.
- Matsuno T. A dynamical model of the stratospheric sudden warming. *J. Atmos. Sci.* 1971. Vol. 28, iss. 6. P. 1479–1493.
- Werner R., et al. Application of wavelet transformation to determine wavelengths and phase velocities of gravity waves observed by lidar measurements. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2007. Vol. 69, iss. 17. P. 2249–2256.
- Yoshiki M., Sato K. A statistical study of gravity waves in the polar regions based on operational radiosonde data. *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105. P. 17995–18011.