

ЛИДАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЯКУТИИ

С.В. Николашкин, С.В. Титов

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

LIDAR INVESTIGATIONS IN YAKUTIYA

S.V. Nikolashkin, S.V. Titov

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia

Аннотация. В статье представлены основные характеристики и описание Якутского лидара, а также полученные на нем данные по коэффициенту аэрозольного рассеяния R и температуры атмосферного слоя (25–60 км) с 2005 по 2016 год. Исследуется поведение температуры стратосферы, во время внезапных стратосферных потеплений (ВСП), наблюдавшихся в январе–феврале над Якутском. Для анализа были привлечены данные со спутника MLS «Aura». Рассматриваются особенности формирования и распада ВСП. В результате анализа коэффициентов аэрозольного рассеяния в ночь с 20 на 21 февраля 2013 был обнаружен аэрозольный слой на высоте примерно 39.5 км который наблюдался на протяжении примерно 1.5 ч, толщина аэрозольного слоя составила 500 м. Анализ карт траекторий воздушных масс для дат с 15 по 28 февраля, выполненный в Красноярском университете для уровней от 30 до 42 км, с шагом 0.25 км по высоте показал, что регистрируемый аэрозольный слой был вызван прохождением болида в атмосфере в районе Челябинска.

Ключевые слова: лидар, коэффициент аэрозольного рассеяния, динамика средней атмосферы, Челябинский болид, внезапные стратосферные потепления.

Abstract. The main characteristics and description of the Yakutsk lidar, as well as the data on the aerosol scattering coefficient R and the atmospheric layer temperature (25–60 km) from 2005 to 2016 are presented in this article. The behavior of the temperature of the stratosphere, during the sudden stratospheric warming (VSP), observed in January-February over the Yakutsk, is investigated. Data were analyzed using MLS "Aura" satellite for analysis. The features of the formation and decay of the VSP are considered. As a result of the analysis of aerosol scattering coefficients on the night of 20 to 21 February 2013, an aerosol layer was detected at an altitude of approximately 39.5 km which was observed for approximately 1.5 hours, the thickness of the aerosol layer was 500 meters. Analysis of air mass trajectory maps for dates from February 15 to 28, performed at the Krasnoyarsk University for levels from 30 to 42 km, in 0.25 km increments in height, showed that the detected aerosol layer was caused by the passage of a fireball in the atmosphere in the Chelyabinsk region.

Keywords: lidar, aerosol scattering coefficient, dynamics of the middle atmosphere, Chelyabinsk bolide, sudden stratospheric warmings.

Описание лидара

С 2004 г. в ИКФИА СО РАН (г. Якутск) на полигоне ШАЛ (61.66° N, 129.37° S) запущен на постоянную эксплуатацию стратосферный лидар. Принципиальная схема лидара представлена на рис. 1, основные характеристики лидара приведены в таблице.

В качестве передатчика используется твердотельный лазер LQ-129В (Фирма Solar LS, Минск) (Nd:YAG) мощностью 300 мДж на второй гармонике с длиной волны 532 нм, с длительностью импульса 13 нс в моноимпульсном режиме, работающий на частоте 20 Гц. Приемником служит направленный в зенит телескоп системы Ньютона с диаметром 0.6 м и фокусным расстоянием 2 м. Отраженные импульсы лазера собираются телескопом и направляются через интерференционный фильтр в ФЭУ, где преобразуются в выходной цифровой сигнал, который через систему счета фотонов поступает на ПК. Пространственное разрешение системы от 75 до 300 м в зависимости от задачи. Регистрация ведется на компьютере через специальный блок счета фотонов, подключаемый через USB 2.0 порт, при помощи интерфейсной программы, написанной с использованием пакета виртуальных приборов LabView 6.1.

Наблюдения проводятся в ясную погоду, начиная с вечерних сумерек в течение ночи со скважностью примерно одно измерение в час. Длительность времени накопления зависит от целей зондирования. Для вычисления температурного профиля время накопления составляет 10–30 мин., а для коэффициента аэрозольного рассеяния R 5–10 мин. Температурный профиль слоя атмосферы и коэффициент аэрозольного рассеяния вычисляются из лидарных данных с помощью программы RAD в диапазоне высот 25–60 км и 5–60 км соответственно. Погрешность измерений в зависимости от высоты составляет 1–3 К на высоте 20 км и 5–15 К на высоте 60 км.

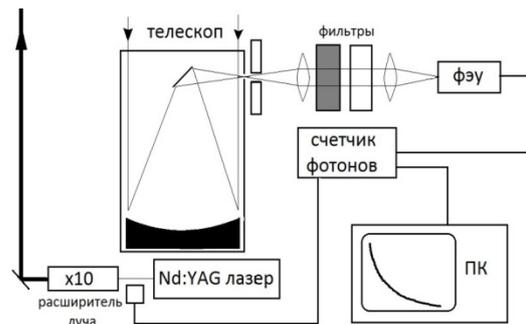


Рис. 1. Принципиальная схема лидара

Принципиальная схема лидара

Тип лазера	Nd:YAG	Расходимость луча, мрад	~40
Частота, Гц	20	Телескоп	Система Ньютона
Длина волны, нм	532	Диаметр зеркала, м	0.6
Выходная энергия, мДж	300	Фокусное расстояние, м	2
Длительность импульса, нс	10–12	Поле зрения, мрад	0.2
Диаметр луча/после расширителя луча, мм	6/60	ФЭУ	Hamamatsu H8259-01

Аэрозольные исследования

За период наблюдений с 2004 по 2016 г. проведено около 2000 сеансов лидарного зондирования средней атмосферы. В ходе обработки данных за 20 февраля 2013 г. был обнаружен аэрозольный слой на высоте 39–40 км с коэффициентом аэрозольного рассеяния $R \sim 1.5$. Слой отчетливо наблюдался на 5 профилях, полученных с временным интервалом 10 минут, начиная с 23:41 до 00:21 LT (UT+10), а на профилях в 20:34 и на 03:02 и последующих его нет. Максимальное значение коэффициента аэрозольного рассеяния составляет 1.69 на высоте 39.55 км в 23:51, а минимальное значение коэффициента аэрозольного рассеяния составляет 1.36 на высоте 39.25 км в 00:21 (рис. 2).

Нашими коллегами из Сибирского федерального университета (г. Красноярск) были произведены расчеты траекторий воздушных масс для интервала дат с 15 по 28 февраля, начатых с момента наблюдения образования метеорного следа 15 февраля в 3:20 UT на высотах от 30 до 42 км, с шагом 0.25 км по высоте. Переносимый атмосферной циркуляцией метеорный след достиг в первый раз Якутска 15–16 февраля, следующий раз при втором витке 20–21 февраля (рис. 3) и на третьем витке 24–25 февраля. К сожалению, 15–16 февраля лидарное зондирование не проводилось, а 24–25 февраля в данных аэрозольный слой не обнаруживался. Так же нами рассматривались и другие возможные варианты происхождения аэрозольного слоя, такие как вулканическое и солнечное, но до 20 февраля ни одного события солнечной активности и вулканического извержения зарегистрировано не было. Следует также отметить тот факт, что на протяжении 10 лет лидарных зондирований в Якутске в районе 40 км аэрозольные слои не наблюдались. Это подтверждает, что аэрозольный слой был вызван именно прохождением болида через атмосферу.

При анализе результатов наблюдений коэффициента аэрозольного рассеяния R с января по март 2012 г., во время солнечных протонных событий (СПС) по данным стратосферного лидара было обнаружено аэрозольное наполнение на уровне стратосферы после солнечных протонных событий 23–24 января и на уровне мезосферы после солнечных протонных событий 7–8 марта (рис. 4, 5). Такая

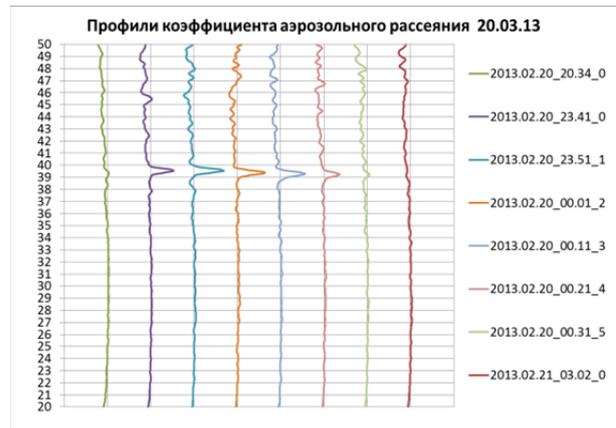


Рис. 2. Профили коэффициента аэрозольного рассеяния 20.03.13 по лидарным измерениям в Якутске. Вертикальные линии сетки соответствуют $R=1$, и каждое измерение смещено на 1 для удобства восприятия

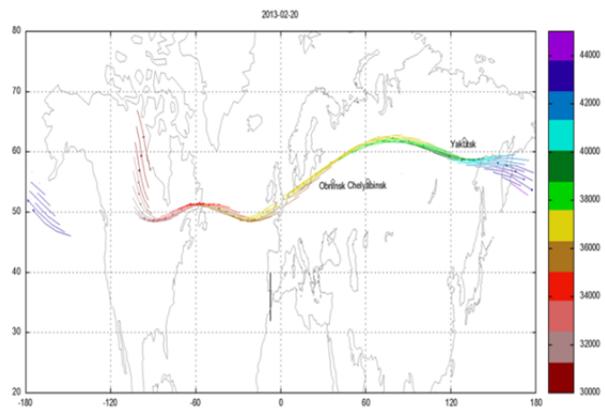


Рис. 3. Карты траекторий воздушных масс с 20 февраля 2013 построены суточные отрезки траекторий за эту дату от 0 до 24 ч, цветом показаны высоты траекторий

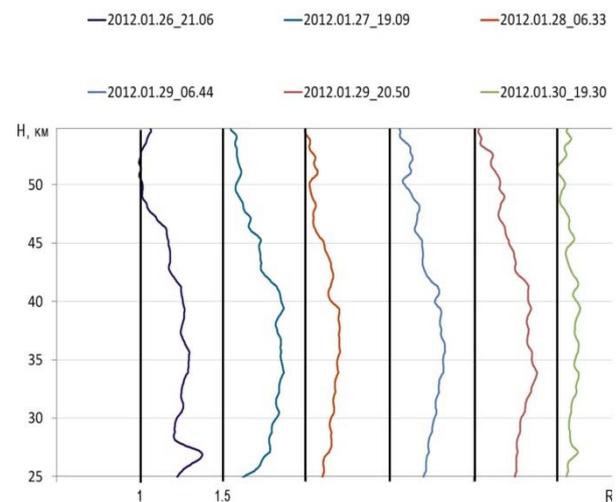


Рис. 4. Профили коэффициента аэрозольного рассеяния с 26 по 30 января 2012 по лидарным измерениям в Якутске

высотная разность в образовании аэрозоля, по видимому, связана с разностью высоты ионизации атмосферы заряженными частицами [Arnold, 1982; Tinsley, 1996-2000; Svensmark, et al. 2009].

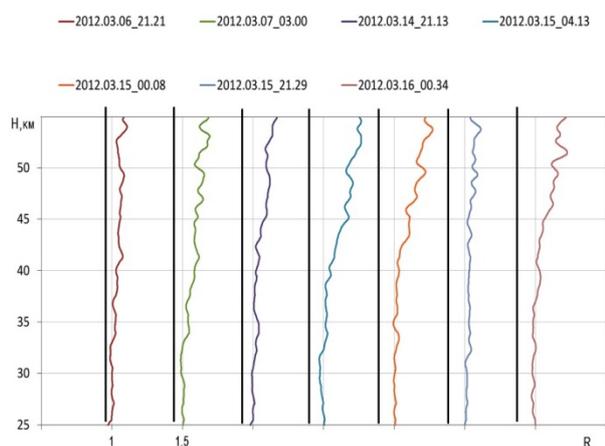


Рис. 5. Профили коэффициента аэрозольного рассеяния 6, 7, 14, 15, 16 марта 2012 по лидарным измерениям в Якутске

Исследования температурой средней атмосферы во время ВСП

Полярная и субполярная зимняя стратосфера Северного полушария характеризуется весьма динамичным поведением, связанным с взаимодействием распространяющихся в тропосфере планетарных волн со стоячей волной орографического происхождения, также средним зональным потоком. При определенных условиях это взаимодействие приводит к явлению т.н. внезапного стратосферного потепления (ВСП). Оно характеризуется резким повышением температуры в стратосфере (на десятки градусов в течении нескольких суток) и наблюдаются в зимний период (с декабря по март) в полярных и субполярных зонах. В зависимости от величины потепления и наличия обращения направления среднего зонального ветра с западного на восточное его подразделяют на типы «major» и «minor» [Matsuno, 1971; Labitzke, 1981; VonZahn, et al., 1998].

За период с 2004 по 2016 г. было рассмотрено 10 ВСП. Их длительность составляла от 3 до 7 дней с повышением температуры в очаге потепления до 50 К. Во время всех ВСП очаг потепления опускался со скоростью примерно 1 км в сут, и как следствие этого стратосфера опускалась до 35 км. Во время ВСП в январе 2010 и 2011 г. наблюдается, также, раздвоение стратосферы.

Во время анализа вариаций вертикального профиля температуры стратосферы обращает на себя внимание наличие волнообразных флуктуаций. Для исследования этих волновых процессов было использовано, непрерывное вейвлет-преобразование с помощью материнского вейвлета гауссиана 8-го порядка, после сглаживания температурного профиля атмосферы скользящим окном 2 км для ВЧ-фильтрации и полиномом 8-го порядка для НЧ-фильтрации. В результате вейвлет-преобразования были выявлены две основные квазимонохроматические волнообразные (КВС) структуры с длинами волн 2–4 км и 5–7 км [Werner, et al. 2007]. Предполагается, что эти флуктуации связаны с вертикальным распространением внутренних гравитационных волн. Основное изменение длины волны квазимонохроматических волнообразных структур происходит на высоте стратосферы. По-видимому, это связано с изменением градиента температуры в стратосфере, т.е. на уровне стратосферы образуется критический уровень, на котором в зависимости от направления среднего зонального ветра планетарные волны затухают с выделением энергии в виде тепла.

Работа поддержана грантами РФФИ №№ 15-05-05320а и 16-35-00204 мол_а.

Список литературы

- Labitzke K. Stratospheric-mesospheric midwinter disturbances: A summary of observed characteristics // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P. 9665–9678.
- Matsuno. A dynamical model of the stratospheric sudden warming // J. Atm. Sci. 1971. V. 28(6). P. 1479–1493.
- VonZahn U., Fiedler J., Naujokat B., Jangematz U., Kruger K. A note on record-high temperatures at the northern polar stratopause in winter 1997/98 // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25, no. 22. P. 4169–4172.
- Werner R., et al. Application of wavelet transformation to determine wavelengths and phase velocities of gravity waves observed by lidar measurements // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2007. V. 69. no. 17. P. 2249–2256.