



# XIV

СИБИРСКОЕ СОВЕЩАНИЕ И ШКОЛА  
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ ПО КЛИМАТО-  
ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ МОНИТОРИНГУ

## ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

19-22 ОКТЯБРЯ 2021 г.

г. ТОМСК

УДК 551.5: 504  
Д23+Е080.4я431

Четырнадцатое Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу: Тезисы докладов российской конференции с международным участием. / Под ред. Е. А. Головацкой. – Томск, 2021. – 263 с.

В сборник включены тезисы докладов по методологии и результатам исследований современного состояния и тенденций изменения климатической системы Сибирского региона. Рассмотрены научно-методические вопросы организации многокомпонентного мониторинга мезомасштабных природно-территориальных комплексов Сибири по физической, химической, биологической и техногенной компонентам системы. Представлены доклады по методологии и результатам исследований, оценке состояния и выявлению происходящих изменений в экосистемах бореальных лесов. Рассмотрены вопросы заболачивания ландшафтов таёжной зоны. Представлены доклады о влиянии антропогенных факторов на трансформацию ландшафтов Сибири.

Сборник представляет интерес для специалистов в области климатологии, метеорологии, экологии, охраны окружающей среды, а также по физическим и техническим проблемам климато-экологических изменений.

## ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕРКАЛЬНЫХ ОБЛАКОВ ВЕРХНЕГО ЯРУСА ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ НАЗЕМНЫМ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫМ ЛИДАРОМ И СПУТНИКОВЫМ РАДИОМЕТРОМ

*Брюханов И.Д.<sup>1,2</sup>, Пустовалов К.Н.<sup>1,3</sup>, Ни Е.В.<sup>1</sup>, Животенюк И.В.<sup>1</sup>, Стыкон А.П.<sup>1</sup>,  
Самохвалов И.В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (г. Томск)

<sup>3</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск),  
plyton@mail.tsu.ru, const.pv@yandex.ru, wolf.ni@yandex.ru, guitarplayer@mail.tsu.ru,  
stikon@yandex.ru, lidar@mail.tsu.ru

Облачность является не только регулятором радиационного баланса в климатической системе Земли, но и важнейшим фактором, определяющим поступление солнечной энергии к её поверхности. Ошибки определения характеристик микроструктуры облаков приводят к неточностям расчётов потоков солнечной радиации с использованием теоретических моделей облачности и неопределённости в оценках тенденций изменения климата. Весьма вероятной причиной расхождения является несовершенство микрофизической модели облаков, в том числе неучёт ориентации несферических ледяных частиц в смешанных и кристаллических облаках.

Важная роль облаков верхнего яруса (ОВЯ) в климатообразовании общепризнана [1, 2]. Их воздействие на излучение определяется размерами, формой и пространственной ориентацией несферических частиц льда в них. При определённых условиях они ориентируются горизонтально, приводя к увеличению коэффициентов отражения и аномальному (зеркальному) обратному рассеянию оптического излучения. В существующих моделях атмосферы форма и ориентация частиц в ОВЯ не учитываются из-за сложностей их описания. Как правило, используется понятие «эффективного радиуса», основанное на равенстве одного из свойств частиц и некоторой модельной сферы [2]. Это упрощение позволяет использовать теорию Ми при расчёте радиационных характеристик ОВЯ, но, по-видимому, является достаточно грубым и приводит к ошибкам синоптических и климатических прогнозов.

Контактное определение ориентации ледяных частиц в облаках невозможно, поскольку она нарушается при заборе проб исследуемой среды. Для оценки степени пространственной ориентации несферических ледяных частиц в ОВЯ используется метод лазерного поляризационного зондирования [3], основанный на измерении 16 элементов матрицы обратного рассеяния света (МОРС). Этот метод реализован в высотном матричном поляризационном лидаре НИ ТГУ (см., например, [4]). Существующие аналоги лидара (отечественные и зарубежные) позволяют определять лишь отдельные элементы МОРС, а остальные рассчитываются на основе свойств симметрии матриц в предположении справедливости приближения однократного рассеяния.

Настоящий доклад посвящён анализу экспериментальных данных, полученных в ходе непрерывного двухдневного эксперимента 8–9 января 2018 г. по зондированию аэрозольных образований (конденсационных следов), сформировавшихся в атмосфере вследствие выбросов продуктов сгорания из двигателей самолётов. Лидарные данные сопоставляются с данными наблюдений ОВЯ из Космоса спектрометрическим MODIS.

В радиусе 100 км от точки стояния лидара НИ ТГУ расположен ряд трасс регулярного авиационного сообщения, благодаря чему следы самолётов, дрейфующие под действием ветра в направлении лидара, могут быть исследованы с его помощью. На рисунке 1 в качестве примера представлена временная динамика вертикального профиля интенсивности лидарного сигнала. Из рисунка видно, что на высоте около 9,5 км регистрировался аэрозольный слой. Его оптические характеристики приведены в таблице 1. Их значения (отношение рассеяния  $R \geq 10$ ,

оптическая толща  $\tau \leq 1$ , элемент МОРС  $m_{44} \leq -0,4$ ) позволяют констатировать [4] наличие в нём преимущественной горизонтальной ориентации частиц льда.

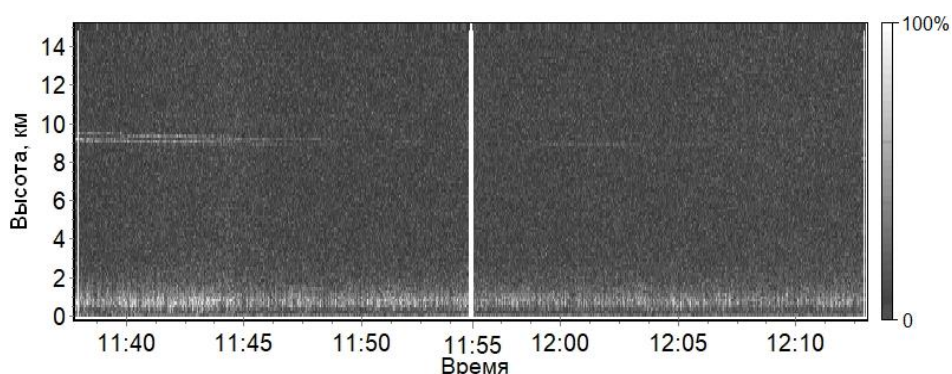


Рисунок 1. Временная динамика вертикального профиля интенсивности лидарного сигнала (08.01.2018 г., 11:37–11:54 LT (a) и 11:56–12:12 LT (б)).

**Таблица 1. Оптические характеристики аэрозольного слоя по данным измерений на лидаре НИ ТГУ 08.01.2018 г.**

| Время регистрации | Оптическая толща $\tau$ | Отношение рассеяния $R$ | МОРС ( $h$ , км)                                                                                                                                                 |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 11:25–12:10       | 0,8                     | 58,1                    | $m(9,0) = \begin{pmatrix} 1,00 & 0,01 & -0,11 & 0,19 \\ 0,01 & 0,82 & -0,01 & -0,09 \\ 0,11 & -0,12 & -0,86 & -0,05 \\ 0,19 & 0,16 & 0,12 & -0,97 \end{pmatrix}$ |

Для совместного анализа с лидарными данными использовались наборы данных спектро радиометра MODIS (спутники Terra и Aqua) уровня обработки 1В (MOD021KM/MYD021KM), содержащие информацию о зарегистрированном радиометром излучении в 36 спектральных каналах (от 0,4 до 14,4 мкм) с пространственным разрешением  $1 \times 1$  км [5]. Для оценки морфологических и оптических характеристик ОБЯ дополнительно были использованы наборы MODIS Atmosphere Level 2 Joint Product (MODATML2/MYDATML2), являющиеся вторым уровнем обработки данных MODIS и содержащие наиболее часто используемые атмосферные, облачные и аэрозольные продукты с разрешением  $5 \times 5$  км [5, 6]. Использовались данные измерений указанных спутников в околополуденные часы ( $\sim 12$ – $14$  ч LT). В этот период времени высота Солнца над горизонтом меняется незначительно, что позволяет сравнивать потоки излучения над некоторым пунктом, полученные при последовательных пролётах спутников. В ходе исследования созданы тематические изображения по лидарным и спутниковым данным, определены значения различных параметров ОБЯ, а также проведён их согласованный анализ.

На рисунке 2 представлены инфракрасные изображения (31 канал MODIS), соответствующие времени лидарной регистрации ОБЯ. Обращают на себя внимание морфологические особенности наблюдавшихся аэрозольных образований, характерные для конденсационных следов самолётов. Этот вывод представляется тем более уместным, поскольку в ходе описываемого лидарного эксперимента такие следы регистрировались во множестве [7]. В таблице 2 представлены значения потока отражённого коротковолнового излучения ( $Q$ ), зарегистрированные различными спектральными каналами спектро радиометра MODIS в точке стояния НИ ТГУ (в ближайшем пикселе) во время дневных пролётов спутников Aqua и Terra 08.01.2018 г. На рисунке 3 представлена временная динамика оптических характеристик ОБЯ, оценённых по данным измерений на лидаре НИ ТГУ, а также потока отражённого коротковолнового излучения, зарегистрированного спектро радиометром MODIS, за время двухдневного эксперимента. По лидарным данным видна неоднократная регистрация зеркальных аэрозольных слоёв.

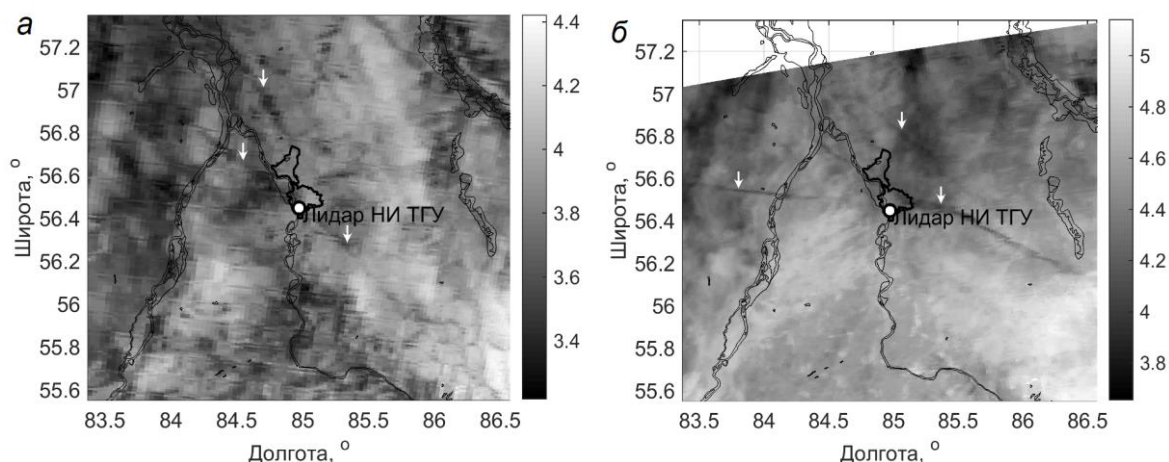


Рисунок 2. Спутниковые изображения облаков верхнего яруса (конденсационных следов самолетов) по данным 31 канала (10,780–11,280 мкм) спектро радиометра MODIS за 11:55 LT 08.01.2018 г. (а) и 14:25 LT 09.01.2018 г. (б). Стрелками отмечены ОБЯ вблизи пункта лидарного зондирования.

**Таблица 2. Отражённое коротковолновое излучение ( $Q$ ), зарегистрированное различными спектральными каналами спектро радиометра MODIS в точке стояния лидара НИ ТГУ во время дневных пролётов спутников Aqua и Terra.**

| Дата              | Время, LT | $Q$ , Вт/м <sup>2</sup> /мкм/ср |                           |                           |                            |                            |                           |                            |                           |
|-------------------|-----------|---------------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|
|                   |           | Канал 8<br>405-<br>420 нм       | Канал 9<br>438-<br>448 нм | Канал 3<br>459-<br>479 нм | Канал 10<br>483-<br>493 нм | Канал 11<br>526-<br>536 нм | Канал 4<br>545-<br>565 нм | Канал 12<br>546-<br>556 нм | Канал 1<br>620-<br>670 нм |
| 08.01.<br>2018 г. | 11:55     | 61,2                            | 26,6                      | 69,3                      | 63                         | 51,6                       | 47,7                      | 49,7                       | 41,1                      |
|                   | 13:35     | 89,4                            | 36,6                      | 88,6                      | 82,1                       | 64,4                       | 61,8                      | 62,1                       | 53,8                      |
|                   | 13:45     | 61,3                            | 25,6                      | 69,3                      | 64,3                       | 55,0                       | 51,3                      | 53,5                       | 44,0                      |
| 09.01.<br>2018 г. | 12:40     | 48,4                            | 20,5                      | 53,6                      | 47,1                       | 38,9                       | 36,8                      | 37,9                       | 31,4                      |
|                   | 14:25     | 62,3                            | 26,4                      | 72,2                      | 66,9                       | 57,9                       | 54                        | 56,3                       | 46,1                      |

Согласно данным таблице 2 и на рисунке 3 (верхняя панель), при регистрации лидаром зеркальных ОБЯ значения потока отражённого коротковолнового излучения, измеренные радиометром MODIS в различных спектральных каналах в околополуденные часы, статистически значимо превышают аналогичные значения, соответствующие моментам времени регистрации ОБЯ без преимущественной ориентации ледяных частиц либо их отсутствие. Отмеченная особенность проявляется во всех спектральных каналах MODIS, измеряющих излучение в видимой части спектра (0,4–0,7 мкм).

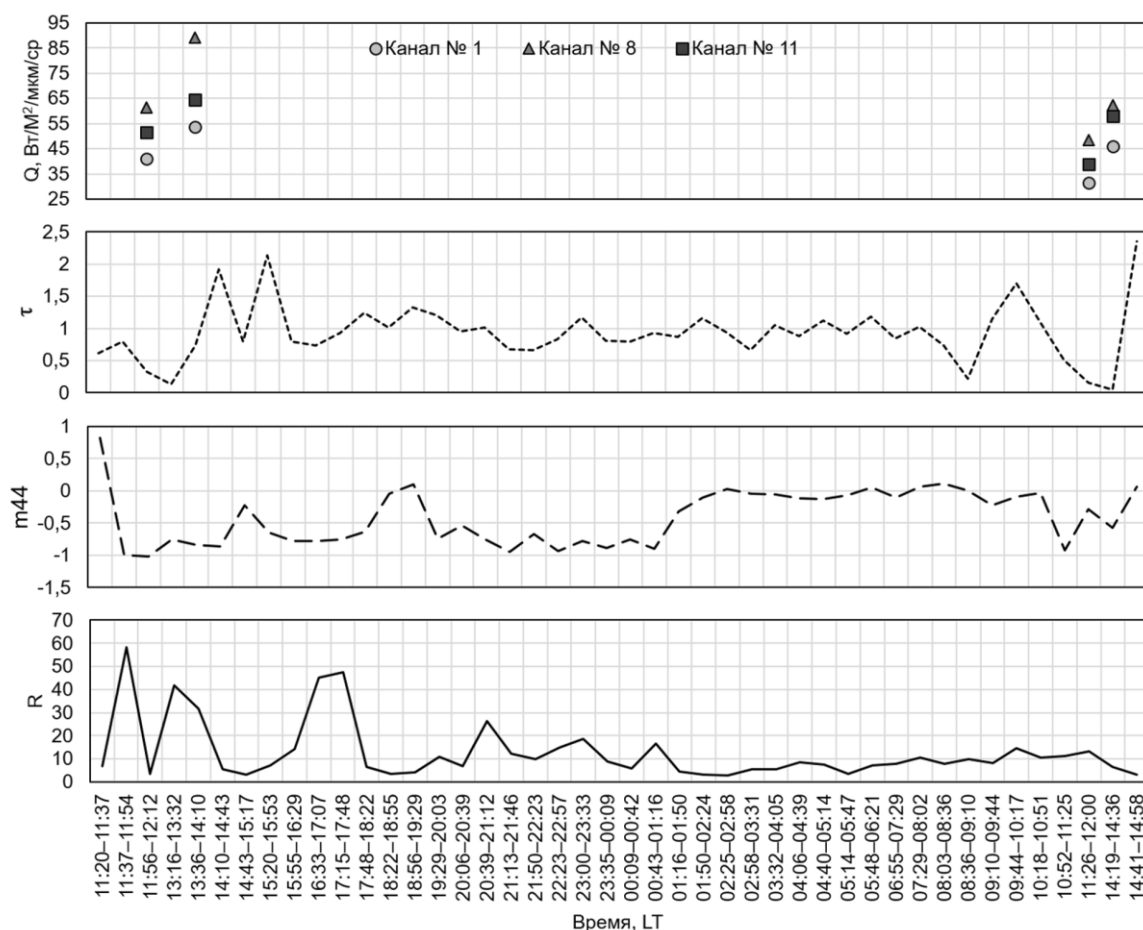


Рисунок 3. Временная динамика отражённого коротковолнового излучения  $Q$  по данным 1, 8 и 11 каналов MODIS, а также оптической толщины  $\tau$ , элемента  $m_{44}$  МОРС и отношения рассеяния  $R$  и по данным лидара НИ ТГУ за 8–9.01.2018 г.

Представленные результаты подтверждают эффективность использования наземного поляризационного лидара и спутникового радиометра MODIS для исследования характеристик ОБЯ антропогенного происхождения с целью восстановления их оптических и радиационных характеристик.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, Грант № 21-72-10089.

1. Liou K.N. // Monthly Weather Review. – 1986. – V. 114. – P. 1167–1199.
2. Дмитриева-Аппаго Л.Р., Трубина М.А. и др. // Труды Гидрометцентра России. – 2017. – № 363. – С. 19–34.
3. Kaul B.V., Samokhvalov I.V., and Volkov S.N. // Applied Optics. – 2004. – V. 43, No. 36. – P. 6620–6628.
4. Брюханов И.Д., Зуев С.В., Самохвалов И.В. // Оптика атмосферы и океана. – 2021. – Т. 34, № 4. – С. 272–279.
5. LAADS Web. Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System. Data. – URL: <http://ladsweb.nascom.nasa.gov>.
6. MODIS Atmosphere. Products. Joint Atm. (ATML2). – URL: <https://modis-images.gsfc.nasa.gov/JOINT/index.html>.
7. Samokhvalov I.V., Bryukhanov I.D., Park Soojin, et al. // Proceedings of SPIE. – 2018. – Vol. 10833. – 108335J; DOI: 10.1117/12.2504517.