

УДК 551.576.2

## Статистическая модель оптических толщ облаков в некоторых зонах региона полуострова Ямал по спутниковым данным

Д.Н. Трошкин, В.Е. Павлов\*

*Институт водных и экологических проблем СО РАН  
656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1*

Поступила в редакцию 9.04.2018 г.

Выполнен статистический анализ оптических толщ летних облаков в регионе Обской губы в трех ограниченных зонах над «сухими» участками и участками, включающими крупные водоемы. Используются экспериментальные данные, полученные с европейского спутника ENVISAT (прибор MERIS) в 2008–2011 гг. Установлен вид функций плотности вероятности оптических толщ в каждой из зон. В логарифмических координатах эти функции имеют 3–4 моды. Функции были аппроксимированы набором нормальных логарифмических распределений с подобранными значениями параметров, которые оказались хорошо повторяющимися из года в год. Над малообводненной западной зоной число мод равно трем, а над восточными зонами, через которые с юга протекают полноводные реки с относительно теплыми водами, оно возрастает до четырех. С большой долей вероятности источником образования дополнительной моды с малыми значениями оптических толщ служит процесс испарения воды с последующей конденсацией водяного пара. Высказано предположение, что определенную роль в последнем случае могут играть и антропогенные выбросы, увеличивающие в атмосфере восточных зон число ядер конденсации по сравнению с западной зоной. Приведены графики функций распределения и таблицы параметров аппроксимации, определяющих эти функции. Такие данные могут оказаться полезными при проведении расчетов радиационного режима малых территорий в регионе полуострова Ямал.

*Ключевые слова:* полуостров Ямал, Обская, Гыданская и Байдарацкая губы, функции распределений оптических толщ облаков; Yamal Peninsula, the Gulf of Ob, Khatmyer Bay, Baidaratskaya Bay, probability density of clouds' optical thickness.

### Введение

Происходящие на Земле глобальные изменения климата особо значимы для севера Западной Сибири [1], в том числе для п-ова Ямал, где происходит добыча углеводородов. Потепление вызывает ускорение процесса таяния вечной мерзлоты, что влияет на прочность конструкций функционирующих станций, жилья, трубопроводов и т.п. Возникает необходимость физического моделирования климатических изменений на эксплуатируемых участках мезомасштабного характера с целью возможного последующего прогнозирования этих изменений. К числу важнейших параметров, определяющих тепловой режим системы «атмосфера–подстилающая поверхность», относится облачность [2, 3]. Из-за дефицита данных по ее наземным измерениям в регионе Ямала приходится использовать спутниковую информацию.

В работе [4] мы уже довольно подробно рассматривали вопрос о виде функций плотности вероятности оптических толщ облаков над Западной

Сибирью в летние месяцы 2008–2011 гг. Вся низменность была условно разделена на четыре больших квадранта. В основу анализа облачности были положены данные, полученные из измерений яркости уходящего рассеянного излучения  $L$  на европейском спутнике ENVISAT спектрофотометром MERIS на длине волны 753,75 нм [5]. Ширина полосы пропускания оптики составляла 7,5 нм. Пространственное разрешение было невысоким: размер пикселя  $4,5 \times 4,5$  км. Методика определения оптических толщ облаков с искусственного спутника Земли (ИСЗ) по данным измерений их яркости достаточно подробно изложена в работах [6–8].

Ранее было установлено [4], что над поверхностями, площадь которых занимает четверть Западной Сибири, функции плотности вероятности оптических толщ облаков обычно носят асимметричный вид и имеют три максимума (моды). Как показал анализ, такие кривые могут быть надежно аппроксимированы суммой трех функций, соответствующих логнормальным распределениям. Были определены и параметры этих функций для каждого квадранта. При этом необходимо учитывать следующее обстоятельство. Выполнение вычислительных процедур для площадей, занимающих четверть Западно-Сибирской низменности, автоматически

\* Дмитрий Николаевич Трошкин (uchsec@iwer.ru); Владимир Евгеньевич Павлов (vpavlov\_37@mail.ru).

приводит к пространственному усреднению всех коэффициентов отражения света от лесов, степей, болот, рек, озер и других типов подстилающей поверхности, относящихся к данному квадранту. Поэтому если на повестке дня встанет вопрос о том, какие изменения климата могут происходить в малых зонах Западной Сибири с фиксированным альбедо, то для ответа на него следует иметь в наличии соответствующие радиационные модели, относящиеся конкретно к этим территориям. Так, например, известно, что интенсивность таяния вечной мерзлоты на севере носит «пятнистый» характер. Поэтому региональные модели должны включать в себя локальные параметры атмосферы и подстилающей поверхности. К таковым следует отнести и оптические толщ облаков, которые, как говорилось выше, в существенной мере ответственны за поступление солнечной радиации на земную поверхность и изменчивость регионального климата.

Исследование роли водных и маловодных участков подстилающей поверхности в формировании функций плотности вероятности оптических толщ облаков и явилось целью настоящей работы.

Для изучения этих функций на севере Западной Сибири нами были выбраны три зоны с координатами 67,5–68,5° с.ш. и 66–67° в.д.; 69–70° с.ш. и 72,625–73,625° в.д., 71–72° с.ш. и 75,375–76,375° в.д. (рис. 1). Первая зона расположена южнее Байдарцаккой губы, в которую практически не впадает крупных рек; вторая – непосредственно в середине Обской губы, а третья – на юге Гыданской губы, где тундра сильно обводнена крупными реками, текущими с юга. Для построения функций плотности вероятности оптических толщ облаков над этими зонами выборочно использована база спутниковых данных, на основе которой ранее исследовалась облачность над всей Западной Сибирью [4]. Функции плотности вероятности, вычисленные для летних сезонов 2008 и 2009 гг., пред-

ставлены на рис. 2. Графики для 2010–2011 гг. имеют аналогичный вид.

## Результаты исследования

Функции плотности вероятности  $F(\lg(\tau))$  (рис. 2) вычислены из ежегодных летних наблюдений с ИСЗ в облачные дни. Анализ  $F(\lg(\tau))$  показывает, что в первой зоне функция распределения содержит три моды, а во второй и третьей – четыре. Итоговое выражение для функций таково:

$$F(\lg(\tau)) = \frac{A_1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{(\lg(\tau)-\lg(\tau_1))^2}{2\sigma_1^2}} + \frac{A_2}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} e^{-\frac{(\lg(\tau)-\lg(\tau_2))^2}{2\sigma_2^2}} + \frac{A_3}{\sqrt{2\pi}\sigma_3} e^{-\frac{(\lg(\tau)-\lg(\tau_3))^2}{2\sigma_3^2}} + \frac{A_4}{\sqrt{2\pi}\sigma_4} e^{-\frac{(\lg(\tau)-\lg(\tau_4))^2}{2\sigma_4^2}} \quad (1)$$

при выполнении условия  $A_1 + A_2 + A_3 + A_4 = 1$ .

Значения дисперсий  $\sigma_i$  и модальных значений логарифмов оптических толщ  $\lg(\tau_i)$ , а также долевой вклад каждой из компонент  $A_i$  сведены в таблицу. Подобного рода таблицы часто используются при выполнении расчетов радиационного режима, в частности в малых зонах севера Западной Сибири в летних условиях.

Заметим, что приводимые результаты исследований обеспечены полноценной статистикой: число рассмотренных случаев в той или иной зоне составляет от 7900 до 13800.

Из таблицы следует, что принципиальных различий в значениях параметров, характеризующих распределение оптических толщ облаков во второй и третьей зонах, по сути, нет. Это означает, что логнормальные распределения в этих зонах имеют сходный вид. Как уже говорилось выше, несколько выделяется первая зона, где функция  $F(\lg(\tau))$  состоит из трех мод. Отличие неслучайно. Температура воды в поверхностном слое Байдарцаккой губы

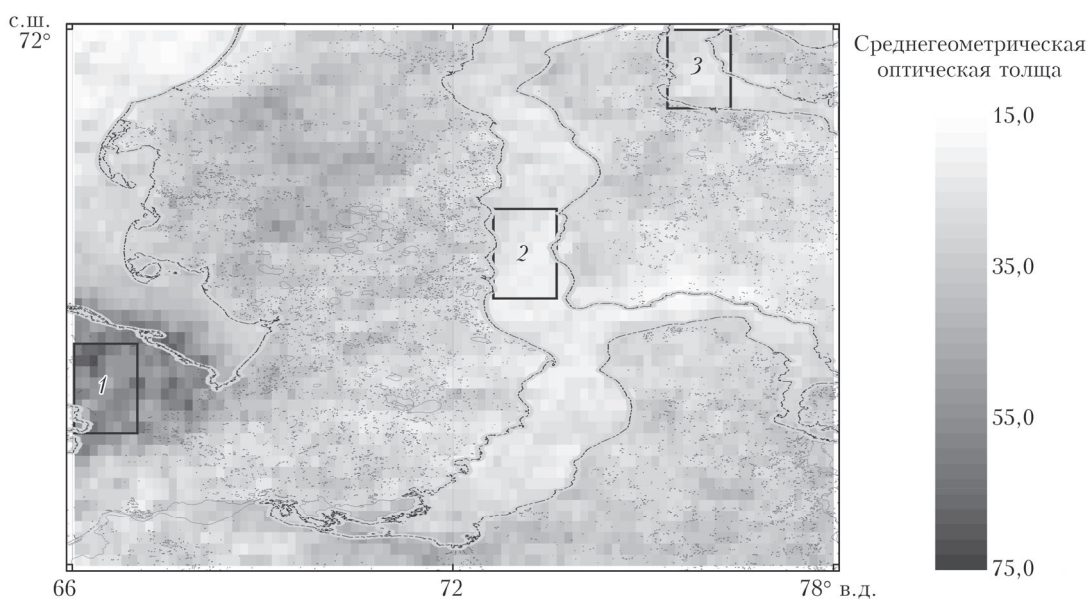


Рис. 1. Карта расположения зон (1–3), в которых выполнялся анализ облачности

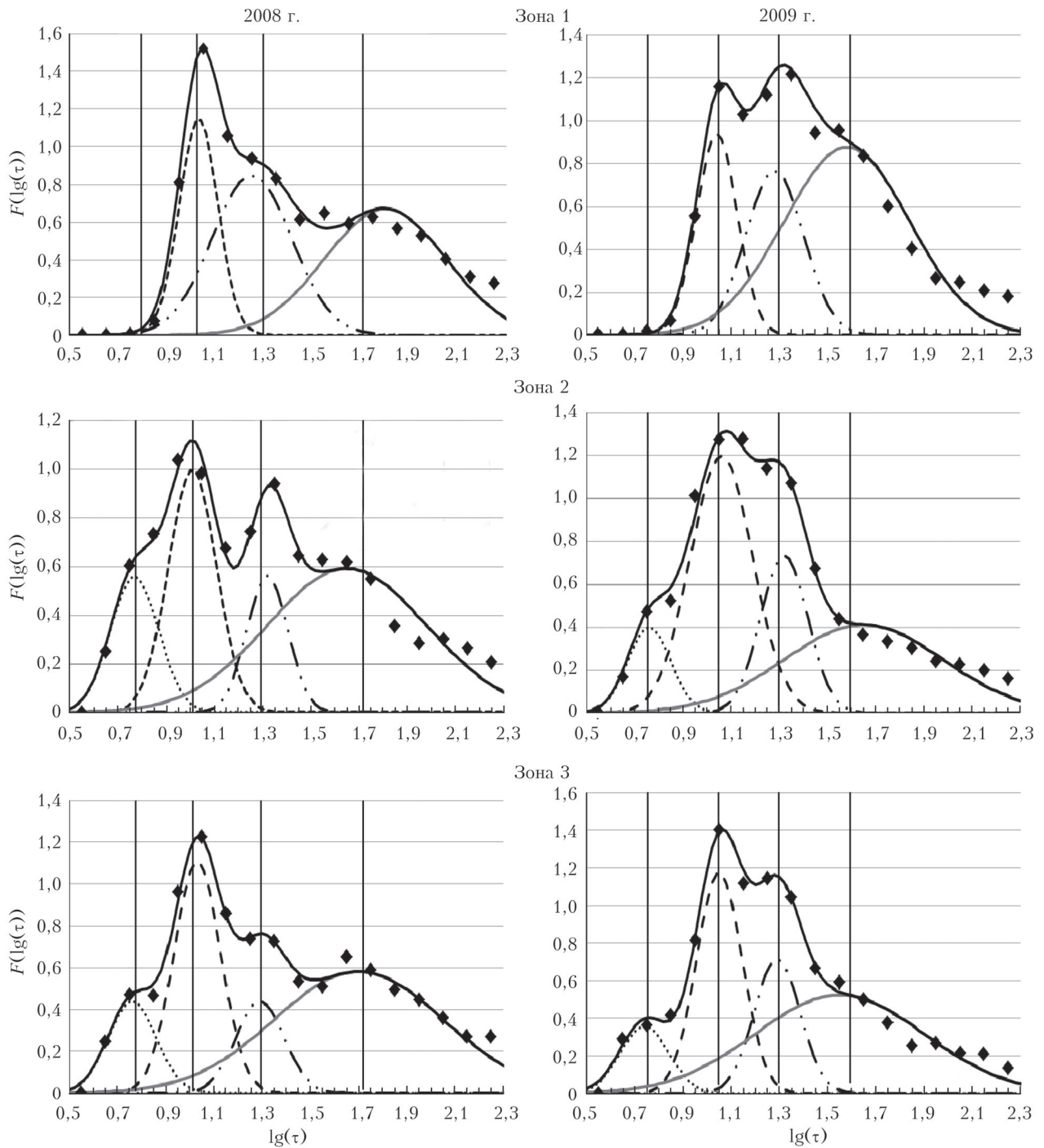


Рис. 2. Зональная зависимость плотности вероятности логарифмов оптических толщ облаков по годам: экспериментальные данные (◆); 1-я мода (.....); 2-я мода (- - -); 3-я мода (- · - ·); 4-я мода (—); распределение (—)

в самое теплое время года не превышает  $+(5-6)^\circ\text{C}$ . Температура воды в Обской губе в середине лета достигает  $+(12-14)^\circ\text{C}$ , в Тазовской  $+(18-20)^\circ\text{C}$ , а в Гыданской  $+12^\circ\text{C}$ . Такое различие температур обуславливает более активное испарение воды с поверхности природных водоемов в восточных зонах по сравнению с западной. Более того, при наличии ядер конденсации, число которых во второй

и третьей зонах из-за добычи углеводородов, видимо, больше, чем в первой, возникает вероятность формирования дополнительного слоя оптически тонких облаков со значениями максимумов логарифмов оптических толщ  $0,5-0,7$ . Они представлены на графиках  $F(\lg(\tau))$  отдельными кривыми Гаусса, расположенными слева (1-я мода). В первой зоне такие кривые отсутствуют.

Значения параметров распределения для четырех мод

Параметр	Зона												Средние значения центров мод
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
	2008			2009			2010			2011			
$\lg(\tau_1)$	—	0,77	0,76	—	0,76	0,74	—	0,77	0,76	—	0,77	0,77	0,76
$\sigma_1$	—	0,1	0,1	—	0,09	0,1	—	0,08	0,1	—	0,1	0,1	
$A_1$	0	0,14	0,11	0	0,09	0,09	0	0,08	0,09	0	0,13	0,13	
$\lg(\tau_2)$	1,03	1,01	1,03	1,04	1,06	1,05	1,07	1,02	1,05	1,05	1,03	1	1,04
$\sigma_2$	0,08	0,1	0,097	0,085	0,13	0,095	0,09	0,105	0,095	0,08	0,085	0,08	
$A_2$	0,23	0,25	0,27	0,2	0,39	0,28	0,19	0,26	0,31	0,22	0,21	0,18	
$\lg(\tau_3)$	1,25	1,32	1,29	1,28	1,32	1,29	1,32	1,29	1,29	1,29	1,26	1,28	1,29
$\sigma_3$	0,165	0,085	0,1	0,12	0,098	0,095	0,085	0,13	0,09	0,1	0,14	0,14	
$A_3$	0,35	0,12	0,11	0,23	0,18	0,17	0,19	0,36	0,23	0,25	0,32	0,32	
$\lg(\tau_4)$	1,8	1,65	1,7	1,58	1,65	1,55	1,68	1,71	1,63	1,58	1,55	1,55	1,64
$\sigma_4$	0,25	0,33	0,35	0,26	0,33	0,35	0,28	0,19	0,25	0,32	0,27	0,26	
$A_4$	0,42	0,49	0,51	0,57	0,34	0,46	0,7	0,3	0,37	0,64	0,34	0,37	

Данный вывод косвенно подтверждается также тем обстоятельством, что количество облачных пикселей во второй и третьей зонах больше, чем в первой, в среднем на 34 и 26%. С нашей точки зрения, данные наблюдений свидетельствуют о том, что именно испарение воды с земной поверхности, по крайней мере для северных территорий Западной Сибири, ответственно за появление облаков с малыми оптическими толщами.

Следует обратить внимание на тот факт, что максимумы функций плотности вероятности  $F(\lg(\tau))$  во всех зонах в течение четырех летних сезонов (2008–2011 гг.) формируются примерно при одних и тех же значениях  $\lg(\tau)$ , что отмечено вертикальными линиями на рис. 2. Видимо, это — климатическая специфика севера Западной Сибири.

Известно, что оптическая толща среды  $\tau$  в основном определяется числом частиц  $N$ , рассеивающих и поглощающих излучение, их формой, ориентацией в пространстве и функцией распределения по размерам  $f(r)$ . Все предыдущие рассуждения относились только к водяным облачным каплям,

форма которых близка к сферической. Вполне возможно, что при самых больших значениях  $\lg(\tau)$  на правом крыле функции распределения возникают отступления от логнормального закона. Есть вероятность, что они связаны с присутствием в атмосфере не только жидких капель, но и крупных ледяных кристаллов [9].

Отчасти это подтверждается данными, приведенными на рис. 3. На нем на оси ординат представлена доля облачных пикселей  $\delta$  с большими оптическими толщами ( $\lg(\tau) > 1,7$ ), а на оси абсцисс — даты летнего периода. Обработаны все данные по Ямалу, полученные в 2008 г. На этом же рисунке изображен ход температуры в приземном слое атмосферы на ст. «Тазовский» в первой половине лета 2008 г.

Видно, что в течение июня с повышением температуры воздуха, а следовательно, и с таянием ледяных кристаллов в тропосфере доля облаков с большими толщами снижается, в июле остается минимальной, а в августе начинается ее медленный подъем. Естественно, что в течение всего лета время

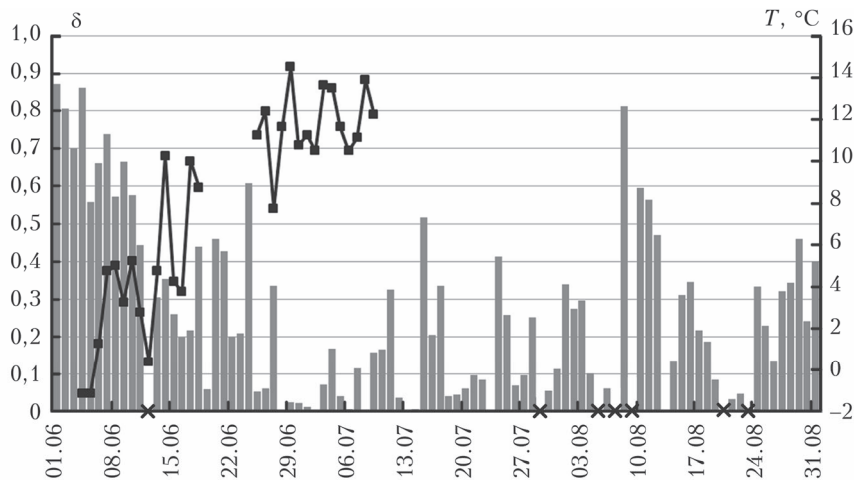


Рис. 3. Доля пикселей с большими оптическими толщами облаков над территорией Ямала летом 2008 г. ( $\delta$ ) и ход температуры приземного воздуха (черная ломаная линия) по данным ст. «Тазовский», «x» — нет данных; отсутствие столбика в иных случаях — нулевая доля пикселей с большими оптическими толщами

от времени возникают резкие скачки оптических толщ, обусловленные ростом числа и размеров частиц, иногда до размеров капель. Последние могут вызывать ливни.

### Заключение

Представление огибающей  $F(\lg(\tau))$  в виде суммы нормальных логарифмических функций в некоторой мере схоже с часто применяемым на практике распределением частиц аэрозоля [10], которое оказалось весьма эффективным при решении многих прямых и обратных задач аэрозольной оптики. Предполагается, что предлагаемое в настоящей статье трех-, четырехмодальное представление плотности вероятности оптических толщ облаков будет использовано специалистами-климатологами при построении локальных моделей облачности в северных регионах.

1. *Оценочный доклад об изменениях климата и их последствий на территории Российской Федерации. Том 1. Изменение климата.* М.: Росгидромет, 2008. 227 с.
2. *Зуев В.Е., Титов Г.А.* Современные проблемы атмосферной оптики. Том 9. Оптика атмосферы и климат. Томск: Спектр, 1997. 271 с.
3. *Кондратьев К.Я.* Исследования Земли из Космоса: научный план системы EOS // Исслед. Земли из космоса. 2000. № 3. С. 82–91.

4. *Трошкин Д.Н., Кабанов М.В., Павлов В.Е., Романов А.Н.* Функция распределения оптических толщ облаков над Западно-Сибирской низменностью // Докл. АН. Геофизика. 2011. Т. 436, № 2. С. 258–261.
5. *MERIS USER GUIDE*, Paragraph 2.7.1.1. Level 2. Physical Justification, 10.1&2.2 Cloud Albedo and Cloud Optical Thickness [Electronic resource]. URL: [http://envisat.esa.int/instruments/meris/pdf/atbd\\_2\\_01.pdf](http://envisat.esa.int/instruments/meris/pdf/atbd_2_01.pdf) (last access: 11.04.2011).
6. *Bower K.N., Choullarton T.W., Latham J, Nelson J., Baker M.B., Jensen J.* A Parameterization of warm clouds for use in the atmospheric general circulation models // J. Atmos. Sci. 1994. V. 51, N 19. P. 2722–2732.
7. *Nakajima T., King M.D.* Determination of the optical thickness and effective particle radius of cloud from reflected solar radiation measurements // J. Atmos. Sci. 1991. V. 48, N 5. P. 728–750.
8. *King M.D.* Determination of the scaled optical thickness of cloud from reflected solar radiation measurements // J. Atmos. Sci. 1987. V. 44, N 13. P. 1734–1751.
9. *Коношонкин А.В.* Рассеяние света на атмосферных ледяных кристаллах при лазерном зондировании: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Томск: Ин-т оптики атмосф. им. В.Е. Зуева СО РАН. Томск, 2017. 283 с.
10. *Розенберг Г.В., Горчаков Г.И., Георгиевский Ю.С., Любовцева Ю.С.* Оптические параметры атмосферного аэрозоля // Физика атмосферы и проблемы климата. М.: Наука, 1980. С. 216–257.

#### *D.N. Troshkin, V.E. Pavlov. Statistical model of cloud optical thickness in specific Yamal areas using satellite-based data.*

The statistical analysis of summer cloud optical thickness over three geographically restricted zones in the region of the Ob Bay (dry and wet zones, coordinates are given) is performed with the use of ENVISAT-based experimental data on the cloud optical thickness obtained in 2008–2011. Type of functions of probability density of cloud optical thickness for each zone is determined. In logarithmic coordinates, each of these functions has several (3–4) maxima, indicating the occurrence of individual modes. The functions are approximated by a set of normal logarithmic distributions with certain parameters. The parameters prove to be well repetitive from year to year. There are three modes above the low-watered western zone, while in the eastern zones, where full-flowing rivers with relatively warm waters run from the south, they increase to four. On the authors' opinion, water evaporation with subsequent condensation promotes the formation of an additional mode with low optical thickness. Anthropogenic emissions, which increase the number of condensation nuclei in the eastern zones, may also play a specific role in the process of enhanced condensation. Distribution function curves and tables with parameters are presented. Such data can be useful for calculations on radiation regime for small Yamal areas.