

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ  
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.576.2; 551.583

**О влиянии современных изменений нижней  
слоистообразной облачности на температурный режим  
приземного слоя атмосферы Сибирского региона**

**В.С. Комаров, Г.Г. Матвиенко, С.Н. Ильин, Н.Я. Ломакина\***

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 9.09.2015 г.

Приводятся результаты анализа влияния нижней слоистообразной облачности ( $Sc$ ,  $St$ ,  $Ns$ ) на долговременные изменения приземной температуры, проведенного для Сибирского региона с использованием результатов районирования его территории по режиму облачности. Показано, что во все сезоны в течение последнего 45-летнего периода (1969–2013 гг.) имеет место слабовыраженное увеличение количества нижней слоистообразной облачности, которое сопровождается достаточно заметным ростом приземной температуры, особенно в полярных районах.

*Ключевые слова:* нижняя слоистообразная облачность, количество облачности, приземная температура воздуха, тренды, Сибирский регион; lower stratiform clouds, cloud amount, air temperature, trends, Siberian region.

**Введение**

Известно [1], что облачность (в том числе и облака нижнего яруса) является существенным фактором, влияющим на изменение радиационного баланса земной поверхности, а через него на изменение термического режима приземного слоя атмосферы. При этом характеристики нижней слоистообразной облачности ( $Sc$ ,  $St$ ,  $Ns$ ), в частности ее среднее количество и долговременные изменения в пространстве и во времени, оказывают определяющее влияние на вариации приземной температуры [2, 3] и, следовательно, на формирование и колебание глобального и регионального климатов. Из этого следует, что совместное изучение долговременных климатических изменений нижней слоистообразной облачности и термического режима приземного слоя атмосферы с учетом новейших данных представляет большой научный и практический интерес. Более того, подобная проблема в метеорологической литературе, особенно для малоосвоенных (как Сибирь) регионов, до сих пор практически не рассматривалась. Можно упомянуть лишь одну обобщающую работу [3], где на основе 8-срочных данных о приземной температуре и количестве общей облачности были изучены их многолетние изменения и соответствующие линейные тренды за 1976–2005 гг., осредненные по пентадам (т.е. по пяти суткам). В результате проведенного анализа

автором [3] было установлено, что в одних сезонных интервалах количество облачности за последние 30 лет росло, а в других оно уменьшалось, причем реакция трендов температуры на долговременные изменения количества облачности была различной в холодное (октябрь–апрель) и теплое (май–сентябрь) полугодия.

Если в холодную половину года положительные тренды количества общей облачности сопровождаются положительными трендами приземной температуры, а отрицательные – ее отрицательными трендами (это обусловлено парниковым эффектом облачности, которая в холодный период задерживает уходящую длинноволновую радиацию Земли из нижней атмосферы, а уменьшение количества облачности сопровождается усилением потери тепла атмосферой и понижением приземной температуры), то в теплое полугодие отмечается обратное соотношение исследуемых трендов, поскольку оно формируется преимущественно за счет приходящей солнечной коротковолновой радиации и зависит от экранирующего влияния облачности, понижающего температуру нижней атмосферы, причем относительно слабый парниковый эффект облачности теплого периода перекрывается отражающей способностью облачности и, следовательно, приводит не к слабому повышению, а к понижению приземной температуры [3].

Здесь следует подчеркнуть, что если проблема влияния долговременных изменений общей облачности на климатические изменения приземной температуры рассмотрена достаточно подробно в [3], то влияние аналогичных изменений количества

\* Валерий Сергеевич Комаров (gfm@iao.ru); Геннадий Григорьевич Матвиенко (magg@iao.ru); Сергей Николаевич Ильин; Наталья Яковлевна Ломакина (lnya@iao.ru).

нижней слоистообразной облачности ( $Sc$ ,  $St$ ,  $Ns$ ) на формирование температурного режима приземного слоя атмосферы до сих пор еще не исследовано (особенно для территории Сибири). Учитывая это, авторы настоящей статьи провели специальные исследования по оценке роли нижней слоистообразной облачности в изменении приземной температуры, играющей важную роль в современном потеплении климата Сибири за последние 45 лет (с 1969 по 2013 г.). Полученные результаты будут рассмотрены ниже.

## 1. Исходные данные и некоторые аспекты их обработки

Основным исходным материалом для решения поставленной задачи послужили ежегодные среднесезонные значения количества нижней слоистообразной облачности ( $Sc$ ,  $St$ ,  $Ns$ ) и приземной температуры, рассчитанные по данным 45-летних (1969–2013 гг.) 8-срочных (0, 3, ..., 21 ч по Гринвичу) наблюдений 60 метеорологических станций (<http://www.ncdc.gov/>). Полученные погодичные значения среднесезонного количества нижней слоистообразной облачности и среднесезонной температуры приземного слоя атмосферы стали основой для оценки и сравнения трендов их синхронного изменения за последние 45 лет (с 1969 по 2013 г.), а также для определения степени коррелированности межгодового изменения этих метеорологических величин между собой.

Здесь следует отметить, что пространственное распределение метеорологических станций по территории Сибирского региона, несмотря на их достаточно большое количество, имеет определенную неоднородность, особенно в полярных районах Сибирского региона, что не соответствует требованиям пространственной однородности данных. А это будет сказываться на качестве сравнения трендов долговременного изменения количества нижней слоистообразной облачности и температуры приземного слоя атмосферы.

Учитывая данное обстоятельство, постанционные погодичные значения среднесезонного количества нижней облачности и температуры приземного слоя атмосферы было подвержены площадному осреднению по специальной методике, в основу которой положена процедура объективной классификации метеорологических объектов и прикладного климатического районирования территорий (в нашем случае территории Сибири) по режиму общей и нижней облачности, описанная в [4, 5]. В результате применения такой процедуры для каждого выявленного однородного облачного района (ООР) вместо информации, поступающей от нескольких отдельных станций, относящихся к конкретному однородному району, использовалось только одно осредненное площадное значение погодичного среднесезонного количества нижней слоистообразной облачности и соответствующие ему значения приземной температуры. По этим модельным данным и строились для каждого однородного облачного района

кривые межгодового изменения среднесезонного количества облаков нижнего яруса ( $Sc$ ,  $St$ ,  $Ns$ ) и приземной температуры, а также определялись линейные тренды и величины их интенсивностей, которые характерны для всех выявленных однородных облачных районов.

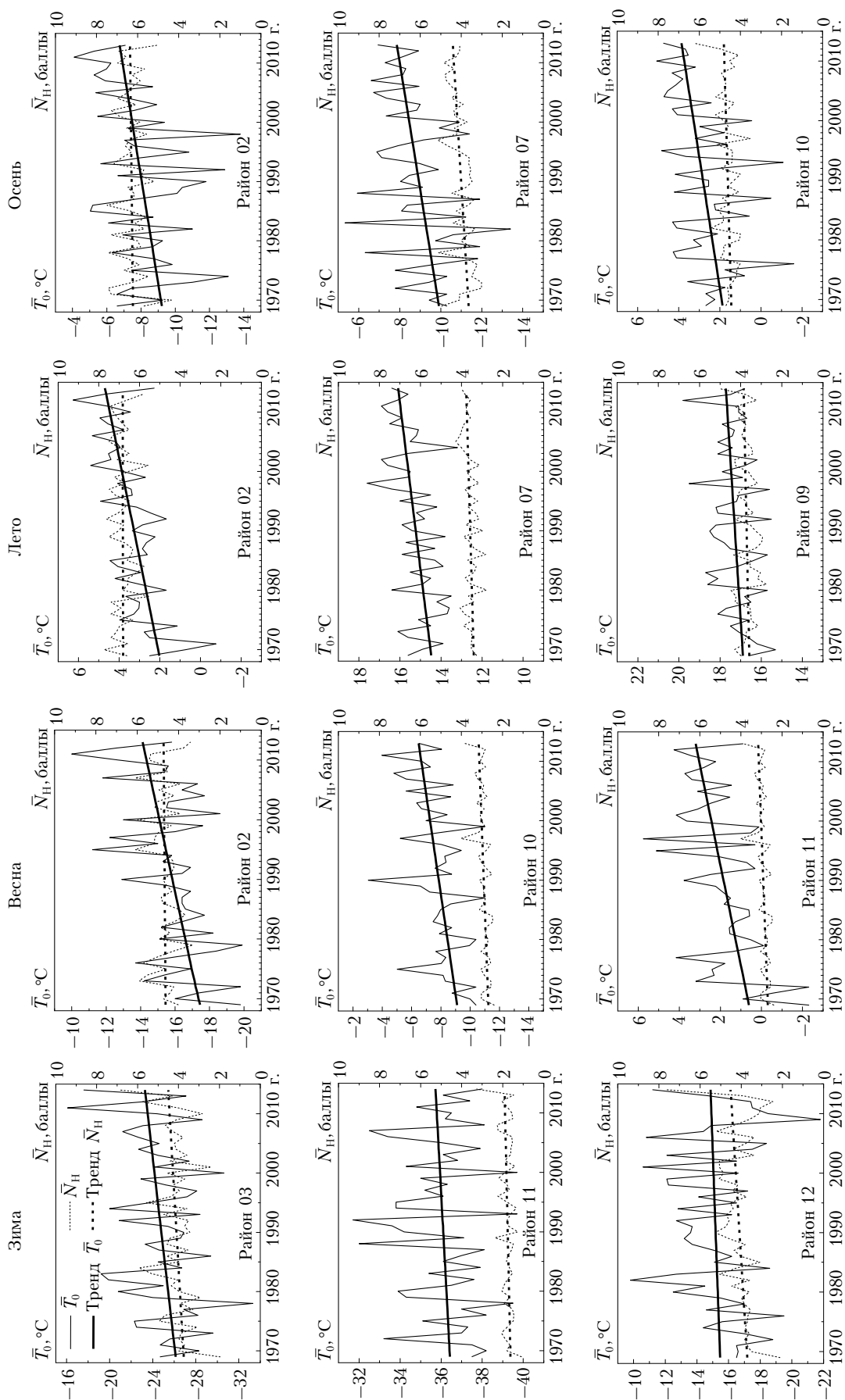
И наконец, на заключительном этапе реализовывалась процедура площадного осреднения среднесезонных значений количества нижней слоистообразной облачности, а также среднесезонных значений приземной температуры, определенных для каждого однородного облачного района с учетом размеров его площади, с целью получения их пространственно-осредненных трендов для всей территории Сибирского региона в целом.

## 2. Тренды долговременного изменения среднесезонных значений количества нижней облачности и приземной температуры над территорией Сибири

Рассмотрим непосредственно полученные результаты, но вначале проанализируем особенности долговременных изменений количества нижней слоистообразной облачности и приземной температуры, наблюдаемые в последние 45 лет (1969–2013 гг.) над территорией Сибирского региона. О характере подобных изменений можно судить по рисунку, где в качестве примера приведены кривые межгодового синхронного изменения среднесезонного количества нижней облачности (они заимствованы из [6]) и приземной температуры, а также их линейные тренды, полученные для трех характерных однородных облачных районов и четырех сезонов (03, 11, 12 для зимы, 02, 10, 11 для весны, 02, 07, 09 для лета и 02, 07, 10 для осени), а также из табл. 1, содержащей значения интенсивностей соответствующих линейных трендов, рассчитанных для всех однородных облачных районов Сибирского региона, выявленных для зимы (декабрь, январь, февраль), весны (март, апрель, май), лета (июнь, июль, август) и осени (сентябрь, октябрь, ноябрь).

Анализ рисунка и табл. 1 позволяет выявить ряд интересных особенностей, свойственных 45-летнему (1969–2013 гг.) изменению количества нижней слоистообразной облачности и реакции приземной температуры на тренды подобного изменения, наблюдаемого в последние годы над территорией Сибири.

В частности, установлено, что за исследуемый временной интервал (1969–2013 гг.), когда над всей территорией Сибирского региона было зафиксировано заметное долговременное увеличение количества нижней слоистообразной облачности, т.е. над этой территорией преобладали положительные тренды с интенсивностью порядка 0,10–0,20 балла/10 лет [6, 7], которым соответствовали положительные тренды приземной температуры, причем за тот же временной интервал, их интенсивность составляла повсеместно (исключая полярные районы) в основном от 0,1 до 0,4 °C/10 лет.



О влиянии современных изменений нижней слоистообразной облачности на температурный...

Кривые межгодового изменения среднесезонного количества нижней облачности  $\bar{N}_n$  и приземной температуры  $\bar{T}_0$ , а также их линейные тренды, полученные для характерных однородных облачных районов и четырех сезонов

Таблица 1

**Интенсивность линейных трендов пространственно-средних среднесезонных значений количества нижней облачности ( $\bar{N}_H$ , баллы/10 лет) и приземной температуры ( $\bar{T}_0$ , °C/10 лет) за 1969–2013 гг.**

Номер ООР	Зима		Весна		Лето		Осень	
	$\bar{N}_H$	$\bar{T}_0$	$\bar{N}_H$	$\bar{T}_0$	$\bar{N}_H$	$\bar{T}_0$	$\bar{N}_H$	$\bar{T}_0$
01	0,20	1,0	0,02	0,7	0,06	0,6	0,04	0,45
02	0,15	0,4	0,02	0,8	0,07	0,6	0,03	0,6
03	0,17	0,6	0,07	0,8	0,12	0,3	0,04	0,4
04	0,18	0,5	0,23	0,4	0,02	0,3	0,13	0,5
05	0,24	0,2	0,04	0,4	0,05	0,5	0,09	0,5
06	0,17	0,2	0,06	0,7	0,05	0,2	0,15	0,3
07	0,21	0,3	0,09	0,9	0,08	0,4	0,26	0,5
08	0,09	0,3	0,19	0,8	0,15	0,4	0,16	0,4
09	0,13	0,2	0,13	0,6	0,06	0,2	0,15	0,4
10	0,21	0,1	0,11	0,6	0,03	0,1	0,08	0,4
11	0,06	0,2	0,08	0,6	0,14	0,2	0,12	0,3
12	0,18	0,1	0,09	0,7	0,06	0,3	0,20	0,2
13	0,17	0,1	0,11	0,6	0,22	0,2	0,25	0,4
14	0,16	0,2	0,07	0,4	—	—	0,20	0,3
15	0,08	0,2	0,04	0,5	—	—	—	—
16	0,14	0,2	0,17	0,5	—	—	—	—
17	0,10	0,1	0,13	0,6	—	—	—	—
18	0,12	0,6	—	—	—	—	—	—
Регион Сибири	0,15	0,3	0,10	0,6	0,09	0,3	0,14	0,4

Однако в полярных широтах Сибири во все сезоны, особенно в зимне-весенний период, реакция приземной температуры на положительные тренды изменения нижней облачности проявляется намного сильнее, поскольку интенсивность положительных трендов приземной температуры составляла здесь: 0,6–1,0 °C/10 лет (ООР 01, 03, 04 зимой), 0,7–0,9 °C/10 лет (ООР 01, 02, 03, 06, 07, 08 весной), 0,5–0,6 °C/10 лет (ООР 01, 02, 05 летом) и 0,5–0,6 °C/10 лет (ООР 01, 02, 04, 05 осенью) соответственно.

И наконец, летом положительные тренды приземной температуры, полученные для территории Сибири по данным 1969–2013 гг. и обусловленные долговременным ростом в этот период количества нижней слоистообразной облачности, имеют повсеместно (исключая полярные широты) наименьшую интенсивность (не более 0,3–0,4 °C/10 лет). Это связано с тем, что летом температурный режим приземного слоя атмосферы над полярными широтами формируется под воздействием приходящей коротковолновой солнечной радиации и зависящей в значительной степени от экранирующего эффекта нижней слоистообразной облачности.

Что касается трендов среднесезонного количества нижней слоистообразной облачности и приземной температуры, полученных для всей территории Сибири в целом, то во всех рассматриваемых сезонах года сохраняется повсеместное преобладание их положительных значений при заметной интенсивности (0,10–0,15 балла/10 лет по облачности и 0,3–0,6 °C/10 лет по приземной температуре).

### 3. О корреляционной зависимости последовательных погодичных среднесезонных значений количества нижней слоистообразной облачности и приземной температуры

Наряду с процедурой сравнения 45-летних трендов долговременного изменения среднесезонных значений количества нижней слоистообразной облачности и приземной температуры представляет большой интерес дополнительно оценить (с помощью коэффициентов взаимной корреляции) роль нижней облачности в формировании температурного режима приземного слоя атмосферы. При этом для такой оценки взяты последовательные погодичные среднесезонные значения количества нижней облачности и приземной температуры, рассчитанные для каждого ООР за период 1969–2013 гг.

Для анализа полученных результатов воспользуемся данными табл. 2, в которой приведены значения коэффициентов взаимной корреляции  $r_{\bar{N}_H \bar{T}_0}$  между среднесезонным количеством нижней слоистообразной облачности и приземной температурой. Анализ полученных коэффициентов взаимной корреляции  $r_{\bar{N}_H \bar{T}_0}$  (табл. 2) показывает, что их величины в значительной степени зависят от сезона и широтного положения анализируемого района.

Учитывая это, рассмотрим особенности пространственного распределения коэффициентов взаимной корреляции среднесезонного количества

Таблица 2

Величины взаимной корреляции  $r_{\bar{N}_H \bar{T}_0}$  среднесезонного количества нижней слоистообразной облачности ( $\bar{N}_H$ , баллы) со значением приземной температуры ( $\bar{T}_0$ , °С), полученные для территории Сибири за 1969–2013 гг.

Номер ООР	Зима	Весна	Лето	Осень
01	0,65	0,64	–0,74	0,50
02	0,78	0,81	–0,57	0,53
03	0,74	0,81	–0,51	0,58
04	0,69	0,53	–0,61	0,46
05	0,66	0,52	–0,62	0,48
06	0,62	0,63	–0,55	0,51
07	0,59	0,67	–0,51	0,53
08	0,64	0,65	–0,60	0,23
09	0,75	0,52	–0,68	0,18
10	0,57	0,54	–0,45	0,21
11	0,55	0,21	–0,26	0,30
12	0,68	0,06	–0,33	0,16
13	0,61	0,28	–0,29	0,16
14	0,81	0,11	–	0,12
15	0,07	0,04	–	–
16	0,61	0,15	–	–
17	0,13	0,21	–	–
18	0,06	–	–	–

нижней слоистообразной облачности с приземной температурой отдельно для каждого сезона.

*Зима.* Для данного сезона характерны следующие особенности:

– во-первых, в зимний сезон исследуемого периода (1969–2013 гг.) во всех однородных облачных районах Сибирского региона, исключая лишь ООР 15, 17, 18, представляющих Забайкалье, преобладают существенные и значимые положительные корреляционные связи между среднесезонным количеством нижней облачности и приземной температурой (значения  $r_{\bar{N}_H \bar{T}_0}$  в основном варьируют в пределах 0,55–0,81);

– во-вторых, над территорией Забайкалья наблюдается слабая положительная корреляционная связь  $\bar{N}_H$  и  $\bar{T}_0$ , для которой характерны малые по своей величине, т.е. незначимые, коэффициенты взаимной корреляции ( $r_{\bar{N}_H \bar{T}_0}$  менее 0,06–0,13).

*Весна.* В этот сезон отмечается такое же пространственное распределение  $r_{\bar{N}_H \bar{T}_0}$ , как и в зимний сезон. А именно, весной корреляционные связи среднесезонного количества нижней слоистообразной облачности со среднесезонным значением приземной температуры, оставаясь положительными, причем на большей части Сибирского региона (ООР 01–10), охватывающей территорию к северу от 60-й параллели, являются также довольно тесными (значения коэффициентов взаимной корреляции  $r_{\bar{N}_H \bar{T}_0}$  варьируют здесь в пределах 0,52–0,81, т.е. являются высокозначимыми величинами). В то же время в южных районах Сибирского региона (к югу от 60° с.ш.) преобладают слабые положительные (ООР 11–17) корреляционные связи, значения коэффициентов корреляции  $r_{\bar{N}_H \bar{T}_0}$  для которых варьируют в пределах от 0,06 до 0,28.

*Лето.* В летний сезон, в отличие от зимы и весны, над всей территорией Сибирского региона преобладают достаточно тесные отрицательные корреляционные связи.

Особенно хорошо коррелируют между собой среднесезонные значения количества нижней облачности с приземной температурой над полярными и субполярными широтами (ООР 01–07) и югом Западной Сибири (ООР 08–09), где коэффициенты их взаимной корреляции  $r_{\bar{N}_H \bar{T}_0}$  составляют по своей величине –0,51 ÷ –0,74. Лишь в четырех однородных облачных районах 10–13, представляющих частично юг Западной Сибири (80–90° в.д.) и южные районы всей Восточной Сибири, отрицательные корреляционные связи между количеством нижней облачности и значением приземной температуры несколько ослабевают (величины  $r_{\bar{N}_H \bar{T}_0}$  варьируют здесь от –0,26 до –0,45).

*Осень.* В осенний сезон, как зимой и весной, корреляционные связи среднесезонного количества нижней слоистообразной облачности с приземной температурой являются также положительными и достаточно тесными, особенно в полярных и субполярных широтах Сибирского региона (ООР 01–07), где значения коэффициентов корреляции  $r_{\bar{N}_H \bar{T}_0}$  составляют 0,46–0,58. В то же время в южных районах Западной и Восточной Сибири (ООР 08–14) хотя и преобладают положительные связи, но они уже менее тесные, и значения коэффициентов взаимной корреляции  $r_{\bar{N}_H \bar{T}_0}$  здесь не превышают 0,30.

Описанные выше особенности пространственного распределения коэффициентов взаимной корреляции  $r_{\bar{N}_H \bar{T}_0}$  по территории Сибирского региона, определяющих тесноту корреляционной связи среднесезонных значений приземной температуры

со среднесезонным количеством нижней слоистообразной облачности за последние годы (1969–2013 гг.), обусловлены различным характером влияния нижней облачности на приземную температуру. Если зимой, весной и осенью над территорией Сибири преобладает парниковый эффект нижней облачности, который согласно [3] наиболее эффективен в холодное полугодие и особенно в высоких широтах (к северу от 60–65° с.ш.), когда радиационный баланс мал или отрицательный, то летом при большой инсоляции парниковый эффект нижней облачности существенно ослабевает и перекрывается отражающей способностью этой облачности, приводящей к понижению температуры приземного слоя атмосферы.

### Заключение

Таким образом, проведенный для Сибирского региона анализ процессов климатического влияния нижней слоистообразной облачности (*Sc*, *St*, *Ns*) на долговременные изменения приземной температуры с использованием результатов районирования его территории по режиму облачности позволяет сделать общий вывод о том, что во все сезоны в течение последнего 45-летнего периода (1969–2013 гг.) имеет место слабо выраженное увеличение количества нижней слоистообразной облачности, которое сопровождается достаточно заметным ростом приземной температуры, особенно в полярных районах, где интенсивность положительных трендов составляла 0,5–1,0 °C/10 лет. Особенно хорошо влияние нижней облачности на температуру приземного слоя атмосферы заметно при использовании коэффициентов взаимной корреляции, величина которых зимой, весной и осенью положительна

и почти над всей территорией Сибири составляет в основном 0,50–0,85, а летом отрицательна (при  $r_{N_{11}T_0}$  от –0,51 до –0,74). Такая особенность связана с меняющимися процессами: в холодный период преобладает парниковый эффект нижней облачности, а в теплый – ее отражательная способность.

1. *Матвеев Л.Т., Матвеев Ю.Л.* Облака и вихри – основа колебаний погоды и климата. СПб.: Изд. РГМУ, 2005. 327 с.
2. *Марчук Г.Н., Кондратьев К.Я., Козодеров В.В., Хворостюков В.И.* Облака и климат. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 512 с.
3. *Шерстюков Б.Г.* Изменение, изменчивость и колебания климата. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2011. 293 с.
4. *Комаров В.С., Нахтигалова Д.П., Ильин С.Н., Лавриненко А.В., Ломакина Н.Я.* Климатическое районирование территории Сибири по режиму общей и нижней облачности как основа для построения локальных облачных моделей атмосферы. Часть 1. Методические основы // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 10. С. 895–898.
5. *Комаров В.С., Нахтигалова Д.П., Ильин С.Н., Лавриненко А.В., Ломакина Н.Я.* Климатическое районирование территории Сибири по режиму общей и нижней облачности как основа для построения локальных облачных моделей атмосферы. Часть 2. Результаты климатического районирования // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 10. С. 899–905.
6. *Комаров В.С., Матвиенко Г.Г., Ильин С.Н., Ломакина Н.Я.* Оценка локальных особенностей долговременного изменения облачного покрова над территорией Сибири с использованием результатов ее климатического районирования по режиму общей и нижней облачности // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 1. С. 59–65.
7. *Комаров В.С.* Региональные особенности долгопериодного изменения облачного покрова в Сибирском секторе Северного полушария за последние 45 лет (1969–2013 гг.) // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 12. С. 1079–1084.

*V.S. Komarov, G.G. Matvienko, S.N. Il'in, N.Ya. Lomakina. About the influence of modern changes in the lower stratiform clouds on the temperature regime of surface air over Siberia.*

The paper presents the analysis of the influence of the lower stratiform clouds (*Sc*, *St*, *Ns*) on long-term changes in surface temperature, performed for Siberia using the results of zoning of the territory according to cloudiness conditions. It has been shown that there is a weakly marked increase in the amount of low stratiform clouds during all seasons in the last 45-year period (from 1969 to 2013), which is accompanied by a quite noticeable increase in the surface temperature, especially in the polar regions.