

Статистическая структура и долговременные изменения нижней слоистообразной облачности над регионом Сибири как основа для метеорологической поддержки решения прикладных задач. Часть 2. Долговременные изменения нижней слоистообразной облачности

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

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

Поступила в редакцию 31.03.2015 г.

Представлены результаты анализа климатических изменений нижней слоистообразной облачности (Sc , St , Ns) над территорией Сибири за последние 45 лет (1969–2013 гг.), выполненного по данным наземных метеорологических наблюдений 60 станций. Исследования долговременных изменений среднесезонных значений количества и высоты нижней границы облаков нижнего яруса были проведены с использованием кривых межгодового хода, а также линейных трендов и величин их интенсивности.

Ключевые слова: нижняя слоистообразная облачность, количество облачности, высота нижней границы, долгопериодные изменения, тренды, Сибирский регион; lower stratiform clouds, cloud amount, cloud base height, long-term changes, trends, Siberian region.

Введение

В первой части настоящей статьи [1] приводятся новые и наиболее полные сведения о статистической структуре двух основных характеристик нижней слоистообразной облачности (Sc , St , Ns), а именно ее количестве N_H и высоте нижней границы $H_{НГ}$, рассчитанные для Сибирского региона по данным многолетних (1969–2013 гг.) 8-срочных метеорологических наблюдений 60 синоптических станций. Здесь следует подчеркнуть, что рассматриваемые характеристики нижней облачности в течение исследуемого периода не остаются неизменными и их значения претерпевают заметные долговременные колебания, которые четко проявляются на региональном уровне, в том числе и над территорией Сибири. Учитывая это, в последние годы данному вопросу уделялось большое внимание (см., например, [2–6]). Однако до сих пор еще у специалистов не сложилось единого мнения о современных (вторая половина XX в. – начало XXI в.) тенденциях долговременного изменения количества облаков нижнего яруса, проявившихся над территорией Сибирского региона.

Что касается долговременных изменений высоты нижней границы слоистообразных облаков нижнего яруса, то этот вопрос до настоящего времени в литературе не рассматривался.

Из сказанного выше следует, что данная проблема является достаточно актуальной и требует своего скорейшего решения. Учитывая это, в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН в последние годы были развернуты широкие исследования по оценке долговременных изменений количества нижней облачности, проводимой на примере Сибирского региона. Первые результаты этих исследований рассмотрены в [7]. Однако они получены по данным наблюдений лишь ограниченного числа (всего 25) метеорологических станций, что не позволило описать с требуемой достоверностью и детализацией особенности пространственного распределения линейных трендов такого изменения по территории Сибири, и к тому же в использованные для анализа статистические ряды не включены данные наблюдений за 2013 г. Кроме того, в [7] в качестве облаков нижнего яруса взяты не три формы облачности (Sc , St , Ns), как это принято в метеорологии [8], а пять (Sc , St , Ns , Cu , Cb), выбранных по аналогии с [6] в соответствии с высотой их нижней границы, не превышающей 2 км. И наконец, в [7] нет никакой информации о долговременных изменениях высоты нижней границы слоистообразных облаков нижнего яруса.

* Валерий Сергеевич Комаров (gfm@iao.ru); Геннадий Григорьевич Матвиенко (mgg@iao.ru); Наталья Яковлевна Ломакина (lnya@iao.ru); Сергей Николаевич Ильин; Андрей Викторович Лавриненко (gfm@iao.ru).

Для устранения отмеченных недостатков авторами настоящей статьи были проведены для того же региона Сибири более полные и детальные исследования по оценке современных тенденций долговременного изменения как количества, так и высоты нижней границы слоистообразных облаков нижнего яруса (Sc , St , Ns), которые определялись по данным уже 60 метеорологических станций, а полученные статистические ряды содержали 45-летние (1969–2013 гг.) погодичные среднесезонные значения рассматриваемых характеристик нижней облачности. Результаты этих исследований и будут рассмотрены ниже.

1. Исходные данные

Как и в случае с анализом статистической структуры характеристик нижней слоистообразной облачности (см. [1]), основным исходным материалом для оценки их долговременных изменений послужили многолетние (1969–2013 гг.) данные 8-срочных метеорологических наблюдений за количеством и высотой нижней границы облаков нижнего яруса (Sc , St , Ns) 60 синоптических станций Сибирского региона из архива NOAA (<http://www/ncdc/noaa.gov>).

При этом для статистического анализа особенностей долговременных изменений количества и высоты нижней границы облаков нижнего яруса над территорией Сибири в период с 1969 по 2013 г. были использованы кривые межгодового хода, а также линейные тренды долговременного изменения среднесезонных значений указанных характеристик и величины их интенсивности (баллы/10 лет и км/10 лет). Сразу же подчеркнем, что оценка долговременного изменения характеристик нижней слоистообразной облачности проводилась нами для всего 45-летнего периода (с 1969 по 2013 г.), используемого для определения общей тенденции их современного изменения.

2. Долгопериодные изменения среднесезонного количества нижней слоистообразной облачности

Рассмотрим результаты статистической оценки современных тенденций долговременного изменения количества и высоты нижней границы слоистообразных облаков нижнего яруса (Sc , St , Ns), наблюдаемых в различных физико-географических районах Сибирского региона. При этом в первую очередь проанализируем данные о характере изменения среднесезонного количества нижней облачности. Здесь следует отметить, что проведенные к настоящему времени исследования по данному вопросу не позволяют выработать единого мнения о характере современного долговременного изменения количества нижней слоистообразной облачности над таким регионом, как Сибирь. Действительно, согласно [2–4] во второй половине XX в. – первые

годы XXI в. над территорией Сибирского региона наблюдалось уменьшение количества облаков нижнего яруса, однако по другим данным (см., например, [5–7]) для того же периода характерно, наоборот, увеличение количества этого типа облачности.

На наш взгляд, причинами такого разногласия в значительной степени являются использование в разных публикациях несопоставимых временных интервалов, различного количества взятых метеорологических станций, разных по объему статистических выборок, объединение в одну совокупность данных, взятых за различные сроки синоптических наблюдений (от двухсрочных до восьмисрочных) и т.п. Учитывая все вышесказанное, авторами настоящей статьи для оценки современных тенденций долговременного изменения количества облаков нижнего яруса над территорией Сибирского региона были взяты максимально возможные (по длительности) и однородные статистические ряды, полученные по данным 45-летних 8-срочных метеорологических наблюдений 60 синоптических станций (для Сибири это сделано впервые). Это позволило исключить при статистическом анализе трендов указанные выше недостатки в исходных данных и определить со значительно большей достоверностью и детализацией пространственное распределение линейных трендов долговременного изменения количества нижней слоистообразной облачности по территории Сибирского региона.

О характере этих трендов можно судить по рис. 1, где в качестве примера приведены кривые межгодового изменения среднесезонного количества нижней слоистообразной облачности N_n и соответствующие им линейные тренды, полученные для всего исследуемого периода и некоторых характерных метеорологических станций Сибирского региона, а также по рис. 2, *a*, на котором показано пространственное распределение по территории Сибири значений интенсивности выявленных трендов (баллы/10 лет), полученных для временного интервала (1969–2013 гг.) по данным всех 60 сибирских станций.

Здесь следует подчеркнуть, что особенности пространственного распределения интенсивности линейных трендов будем анализировать для каждого сезона в отдельности. Так, анализ рис. 1 и 2, *a* показал, что:

– *зимой* в полярных районах всего Сибирского региона (к северу от 70° с.ш.) в рассматриваемый период (1969–2013 гг.) преобладает явная тенденция к повсеместному увеличению среднесезонного количества нижней слоистообразной облачности, причем интенсивность этого увеличения заметно возрастала с запада на восток (над Западной Сибирью она не превышала 0,10 балла/10 лет, а над Восточной ее значения достигали 0,20 балла/10 лет). Более сложная картина в распределении интенсивности долговременного изменения количества нижней слоистообразной облачности характерна для остальной территории Сибирского региона. В частности,

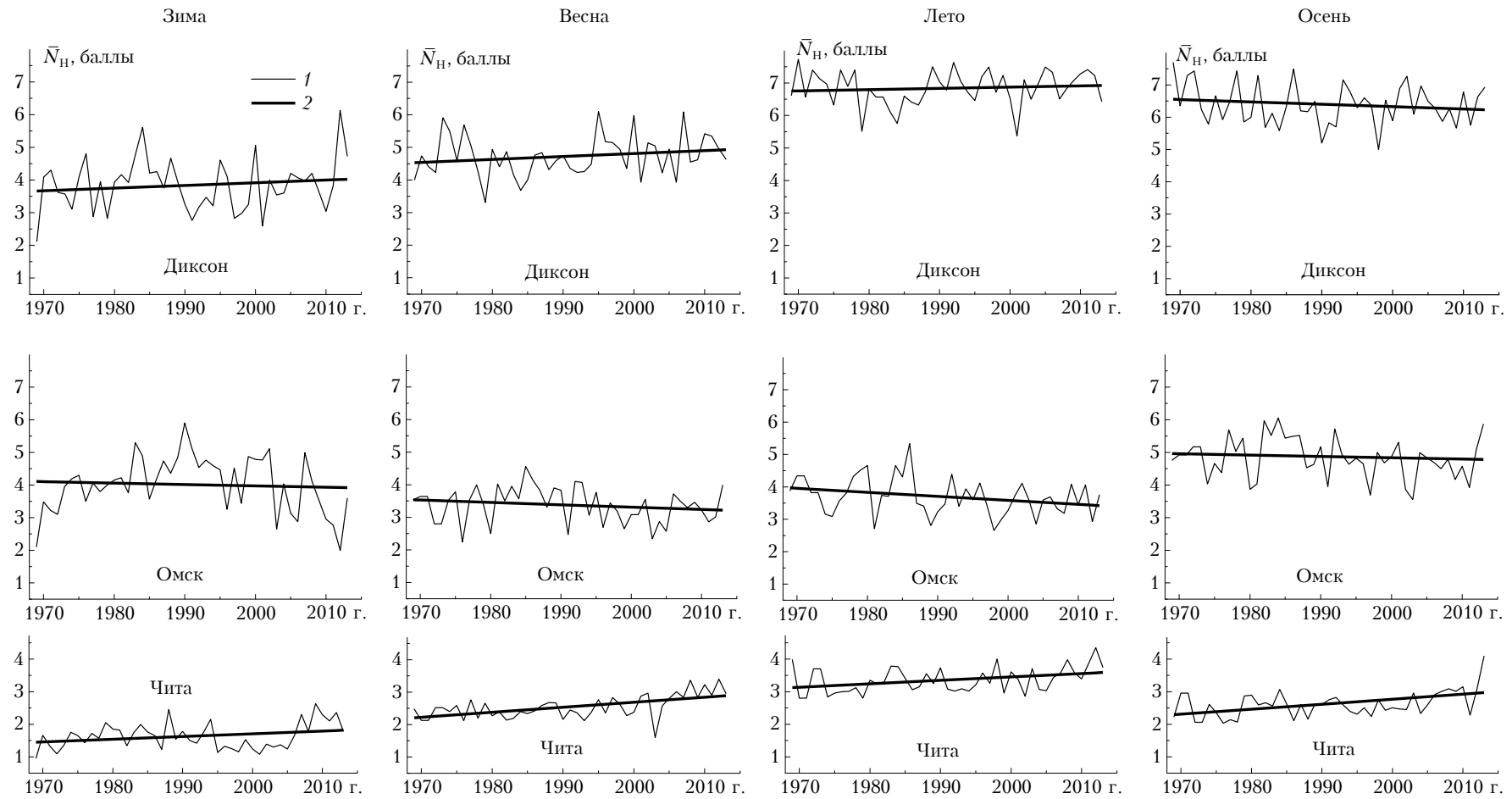
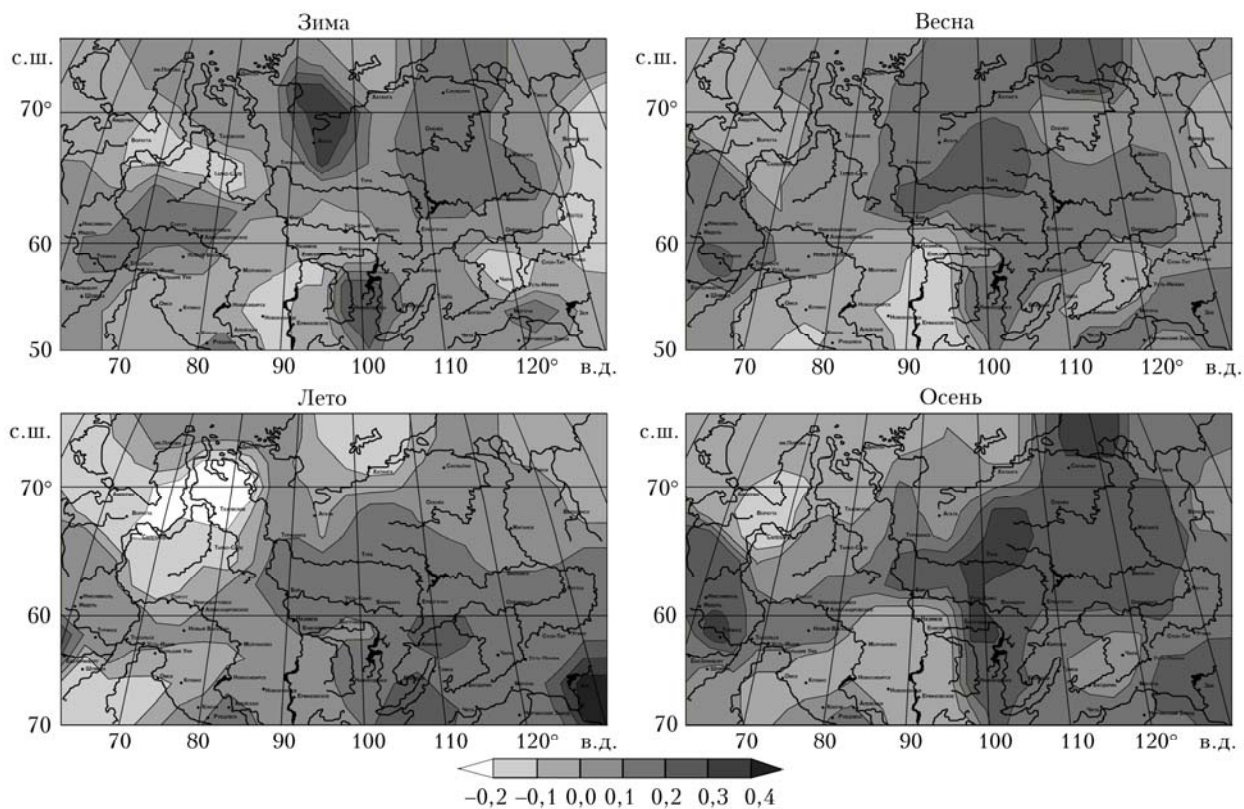
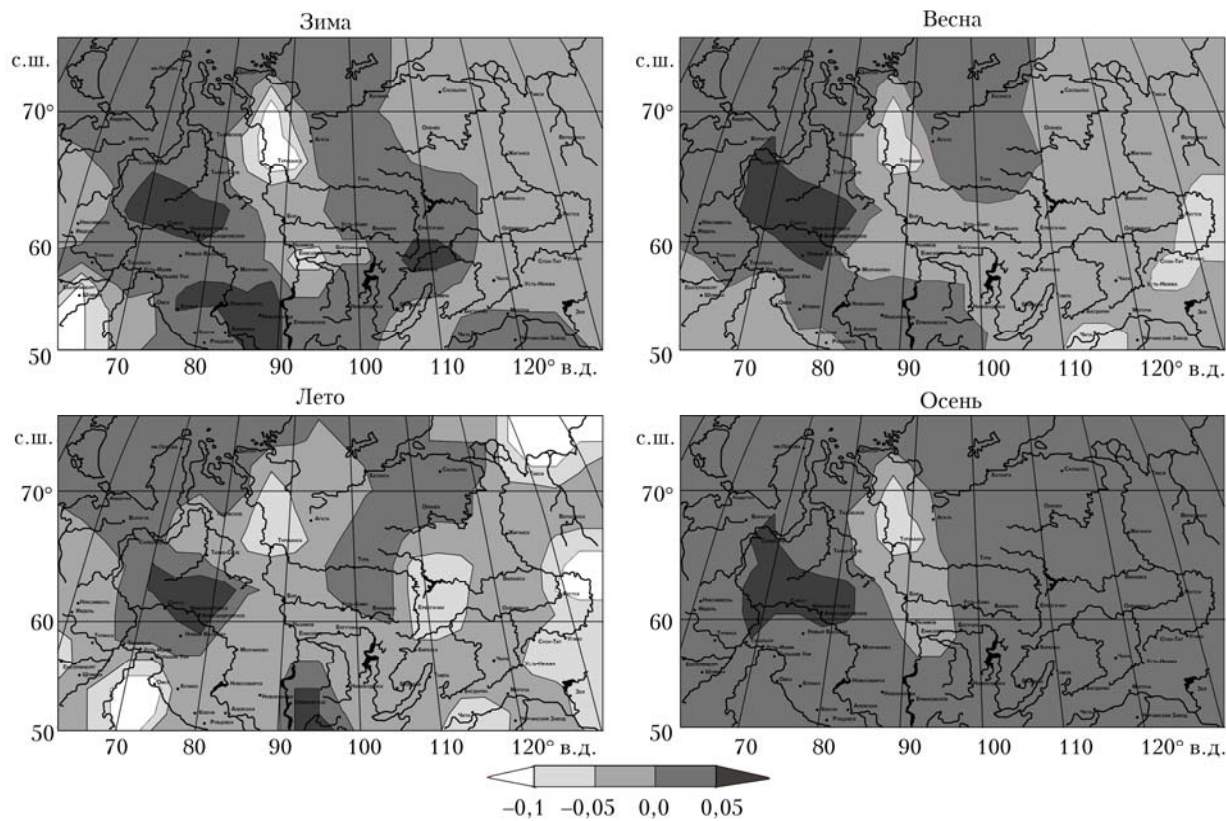


Рис. 1. Долгопериодные изменения среднесезонного количества нижней слоистообразной облачности (1) и их линейные тренды (2), полученные по данным 1969–2013 гг. некоторых характерных станций Сибирского региона



a



б

Рис. 2. Пространственное распределение по территории Сибири интенсивностей линейных трендов долговременного изменения среднесезонных значений количества слоистообразных облаков нижнего яруса (баллы/10 лет) (*a*) и высоты их нижней границы (км/10 лет) (*б*)

над большей частью Западной Сибири в тот же сезон наблюдались три области с различными трендами долговременного изменения количества нижней облачности: в двух из них, расположенных в субполярных широтах (к северу от 63–64° с.ш.) и на юге Западной Сибири (южнее 55–59° с.ш.) соответственно, преобладали слабые отрицательные тренды, а в одной, находящейся вблизи 60-й параллели, наблюдались положительные тренды с достаточно высокой (до 0,21 балла/10 лет) интенсивностью. В то же время над большей частью Восточной Сибири преобладала тенденция к росту среднесезонного количества нижней облачности. При этом на территории Восточной Сибири выделяются три области с максимальной интенсивностью положительных трендов: одна из них (с интенсивностью до 0,38 балла/10 лет) занимает наибольшую площадь в субполярной зоне (между 90 и 110° в.д.), вторая (почти с такой же интенсивностью (порядка 0,30 балла/10 лет) находится к югу от 56-й параллели между 95 и 105° в.д. и, наконец, третья (с интенсивностью до 0,27 балла/10 лет), занимающая наименьшую территорию, располагается почти на тех же широтах, что и вторая область, но вблизи 120-го меридиана.

Лишь над небольшой частью Восточной Сибири (к востоку от 125–130° в.д.) отмечается преобладание достаточно слабых (по интенсивности – не более 0,14 балла/10 лет) отрицательных трендов долговременного изменения количества нижней слоистообразной облачности;

– *весной* пространственное распределение интенсивности линейных трендов долговременного изменения количества нижней слоистообразной облачности по территории Сибирского региона практически полностью повторяет их зимнее распределение.

Действительно, как и зимой, в весенний сезон в полярных районах Сибирского региона в рассматриваемый период (с 1969 по 2013 г.) также преобладала повсеместно тенденция к росту среднесезонного количества нижней слоистообразной облачности, интенсивность которого возрастала с запада на восток (от 0,08–0,09 балла/10 лет в полярных районах Западной Сибири до 0,29 балла/10 лет – в Восточной). Кроме того, над территорией Западной Сибири весной выявлены три области с различными (по знаку) трендами, причем над субполярными (60–70° с.ш.) и умеренными (50–60° с.ш.) широтами они так же, как и зимой, отрицательные, а вблизи 60-й параллели положительные. В то же время над большей частью Восточной Сибири, как и зимой, преобладала явная тенденция к увеличению среднесезонного количества нижней облачности. Лишь к востоку от 125° в.д. и к северу от 62° с.ш. наблюдались слабые отрицательные тренды долговременного изменения количества нижней слоистообразной облачности;

– *летом* пространственное распределение интенсивности линейных трендов долговременного изменения количества нижней облачности несколь-

ко отличается от ее зимне-весеннего распределения. В частности, летом полярная область положительных трендов смещена на север, а на ее место распространилась область отрицательных трендов, расположенная в субполярных широтах Западной Сибири, что обусловило существенное увеличение ее территории и распространение на Восточную Сибирь (до 110° в.д.). Кроме того, на юго-востоке Восточной Сибири образовалась ярко выраженная область положительных трендов с максимальной (для всех сезонов) интенсивностью, достигающей 0,43 балла/10 лет;

– *осенью* пространственное распределение интенсивности линейных трендов долговременного изменения количества нижней облачности по территории Сибири имеет заметное сходство с распределением в весенний сезон. Действительно, осенью, как и весной, над территорией Западной Сибири четко проявляются две области слабых отрицательных трендов (одна из них находится в субполярных широтах, а вторая – на юге этого региона) и одна область положительных трендов, расположенных вблизи 60-й параллели, причем для нее характерна существенная интенсивность (до 0,32 балла/10 лет).

Кроме того, над территорией Восточной Сибири (к северу от 60° с.ш.), где преобладают положительные тренды, осенью, как и весной, выделяются две области их повышенной интенсивности, расположенные в субполярных и полярных широтах между 90-м и 120-м меридианами. Главным отличием осеннего распределения трендов от весеннего является то, что в полярной зоне Сибири весной повсеместно преобладают положительные тренды, а осенью в полярной зоне над значительной частью территории Сибирского региона (от 60 до 110° в.д.) наблюдаются отрицательные тренды.

3. Долговременные изменения среднесезонной высоты нижней границы слоистообразной облачности нижнего яруса

Рассмотрим особенности долговременного изменения высоты нижней границы слоистообразных облаков нижнего яруса. На рис. 2, б приводится пространственное распределение по территории Сибири значений интенсивности выявленных трендов (км/10 лет), полученных для всего временного интервала (1969–2013 г.) по данным 60 метеорологических станций. На рис. 3 в качестве примера показаны кривые межгодового изменения среднесезонной высоты нижней границы облаков нижнего яруса $\bar{H}_{НГ}$ и соответствующие им линейные тренды, построенные для всего исследуемого 45-летнего периода и ряда характерных метеорологических станций Сибири.

Анализ рис. 2, б и 3 показывает, что долговременные изменения высоты нижней границы облаков нижнего яруса (Sc , St , Ns), оцененные для

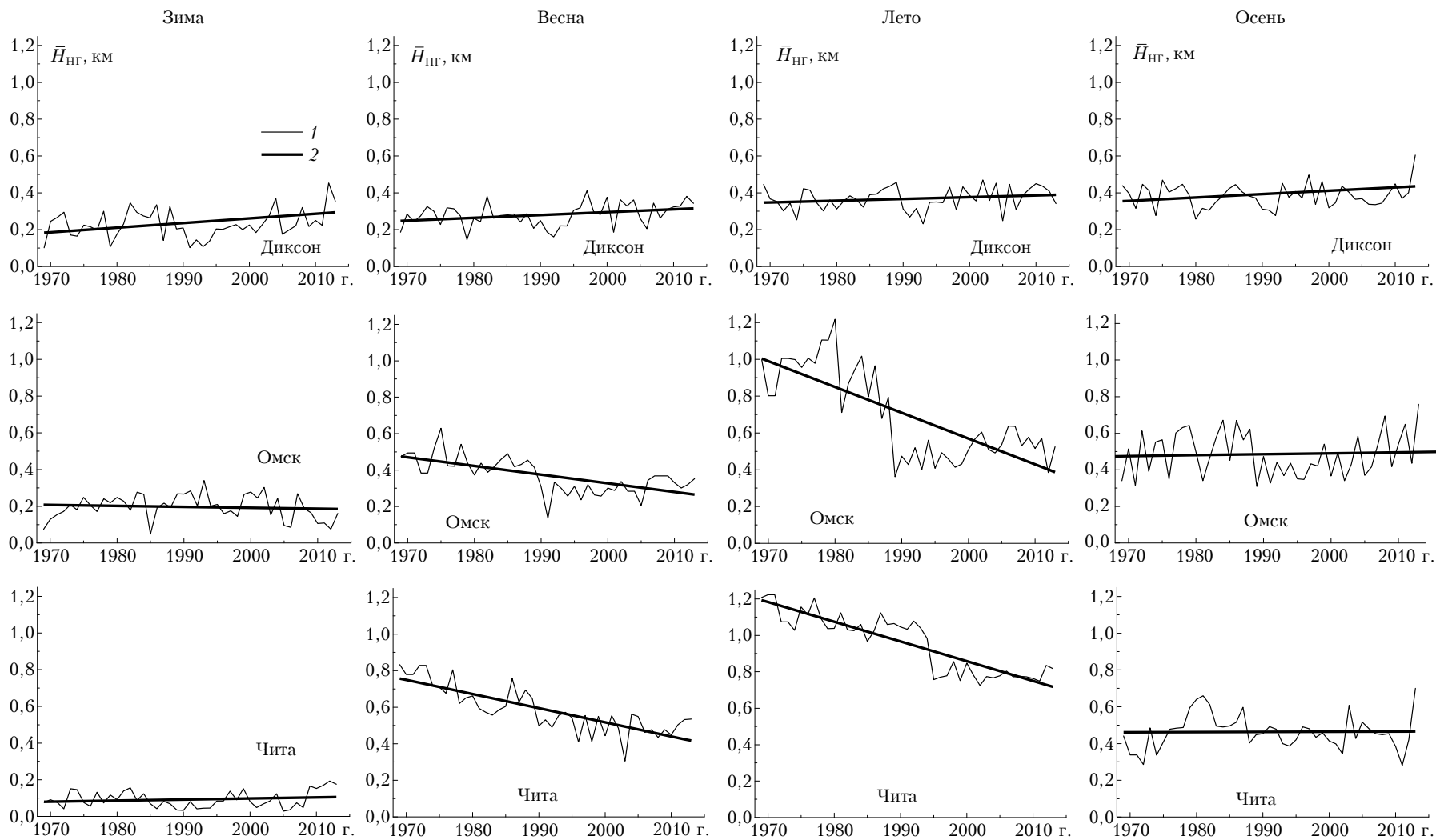


Рис. 3. Долгопериодные изменения среднесезонной высоты нижней границы слоистообразных облаков нижнего яруса (1) и их линейные тренды (2), полученные по данным 1969–2013 г. некоторых характерных станций Сибирского региона

территории Сибири и рассматриваемого временного интервала (1969–2013 гг.), характеризуются двумя основными особенностями. Первая из них связана с явной зависимостью выявленной тенденции такого изменения от географического положения района исследования, а вторая – с малыми величинами интенсивности полученных трендов, которые повсеместно и независимо от сезона варьируют главным образом от $-0,10$ до $0,05$ км/10 лет.

К этому следует добавить, что пространственное распределение интенсивностей линейных трендов долговременного изменения высоты нижней границы облаков нижнего яруса, несмотря на свои небольшие величины, все же имело в каждый сезон определенные особенности (см. рис. 2, б). Так, например, зимой над большей частью территории Западной Сибири (кроме ее западной и юго-западной частей) в рассматриваемый период преобладала заметная тенденция к повышению высоты нижней границы рассматриваемого вида облаков (с интенсивностью до $0,05$ км/10 лет). Однако над остальной частью территории Западной Сибири и почти над всей территорией Восточной Сибири в тот же период (1969–2013 гг.) преобладала тенденция к понижению той же высоты с интенсивностью до $-0,11$ – $-0,14$ км/10 лет.

Весной и летом, как и в зимний сезон, сохранилось практически то же пространственное распределение интенсивностей линейных трендов долговременного изменения высот нижней границы (т.е. преобладание положительных трендов) над территорией Западной Сибири и отрицательных трендов над остальной частью Сибирского региона.

Осенью пространственное распределение интенсивностей линейных трендов долговременного изменения высот нижней границы облаков нижнего яруса по территории Сибири также мало отличается от вышеописанного. Его главным отличием от других сезонов является лишь повсеместное преобладание над территорией Восточной Сибири (к востоку от 100° в.д.) вместо отрицательных положительных трендов изменения высоты нижней границы слоистообразных облаков нижнего яруса.

Заключение

Таким образом, проведенный анализ долговременных изменений количества и высоты нижней границы слоистообразной облачности нижнего яруса (Sc , St , Ns) на основе данных 60 синоптических станций Сибири за временной интервал 1969–2013 гг. позволяет сделать следующие выводы.

1. В полярных районах Сибири в рассматриваемый период (1969–2013 гг.) во все сезоны, кроме летнего, преобладала явная тенденция к повсеместному увеличению среднесезонного количества нижней слоистообразной облачности, а на остальной территории Сибирского региона наблюдалась более сложная картина (если над Западной Сибирью преобладали слабые отрицательные тренды

с интенсивностью менее $0,10$ балла/10 лет, то над большей частью Восточной Сибири отмечалась тенденция к росту среднесезонного количества нижней облачности (при интенсивности до $0,30$ – $0,40$ балла/10 лет)). Летом пространственное распределение трендов долговременного изменения количества нижней облачности было несколько иное, которое произошло за счет смещения полярной области положительных трендов на север и появления на ее месте области отрицательных трендов, обеспечившей существенное увеличение территории последней и распространение ее на Восточную Сибирь (до 110° в.д.). Кроме того, на юго-востоке Восточной Сибири выделяется область положительных трендов с наибольшей для всех сезонов интенсивностью (до $0,43$ балла/10 лет).

2. Во все сезоны, кроме осеннего, над территорией Сибири в исследуемый период (с 1969 по 2013 г.) выделяются две области с различными (по знаку) трендами долговременного изменения высоты нижней границы слоистообразных облаков нижнего яруса, одна из которых располагается над Западной Сибирью и характеризуется почти повсеместным ее увеличением с интенсивностью до $0,05$ км/10 лет, а вторая, занимающая почти всю территорию Восточной Сибири, имеет тенденцию к понижению той же высоты (при интенсивности, достигающей $-0,11$ – $-0,14$ км/10 лет). Осенью пространственное распределение трендов высоты нижней границы облаков нижнего яруса по территории Сибири несколько отличается от других сезонов за счет повсеместного преобладания над территорией Восточной Сибири не отрицательных, а положительных трендов изменения высоты их нижней границы.

Поскольку рассмотренные результаты получены по данным 45-летнего ряда (1969–2013 гг.) (он сопоставим с масштабами климатических изменений) большого числа (60) синоптических станций, то они, безусловно, имеют высокую достоверность и будут полезны при решении различных задач атмосферной оптики и дистанционного оптического зондирования.

1. Комаров В.С., Матвиенко Г.Г., Ломакина Н.Я., Ильин С.Н., Лавриненко А.В. Статистическая структура и долговременные изменения нижней слоистообразной облачности над регионом Сибири как основа для метеорологической поддержки решения прикладных задач. Часть 1. Статистика нижней слоистообразной облачности // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 7. С. 622–629.
2. Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И. Радиационный баланс атмосферы и климатические проявления солнечной переменности // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17, № 12. С. 1003–1012.
3. Хлебникова Е.И., Салль К.А. Особенности климатических изменений облачного покрова над территорией России // Метеорол. и гидрол. 2009. № 7. С. 5–13.
4. Складнева Т.К., Журавлева Т.Б. Повторяемость основных форм облачности над г. Томском: данные

- наблюдений 1993–2004 гг. // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 1. С. 65–68.
5. Байкова И.М., Ефимова Н.А., Строчкина Л.А. Современное изменение облачного покрова над территорией России // Метеорол. и гидрол. 2002. № 9. С. 52–61.
 6. Журавлева Т.Б., Рассказчикова Т.М., Складнева Т.К., Смирнов С.А. Статистика облачности над г. Томском: данные наземных наблюдений 1993–2004 гг. // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 10. С. 880–886.
 7. Комаров В.С., Ильин С.Н., Лавриненко А.В., Ломкина Н.Я., Горев Е.В., Нахтигалова Д.П. Климатический режим нижней облачности над территорией Сибири и его современные изменения. Часть 2. Изменения режима нижней облачности // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 7. С. 584–589.
 8. Облака и облачная атмосфера. Справочник / Под ред. И.П. Мазина, Л.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 647 с.

V.S. Komarov, G.G. Matvienko, N.Ya. Lomakina, S.N. Il'in, A.V. Lavrinenko. Statistical structure and long-term change of the lower stratiform clouds over Siberia as a base for meteorological support for solution of applied problems. Part 2. Long-term change of the lower stratiform clouds.

The work presents the results of the analysis of climatic changes of the lower stratiform clouds (*Sc*, *St*, *Ns*) over the territory of Siberia for the past 45 years (from 1969 to 2013), performed by the data of the 60 ground-based meteorological stations. The study of long-term changes of the amount and base height of low clouds were realized, using the curves of interannual variation, as well as linear trends and their intensity values.