

УДК 551.576, 551.583

## Оценка локальных особенностей долговременного изменения облачного покрова над территорией Сибири с использованием результатов ее климатического районирования по режиму общей и нижней облачности

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

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 8.05.2014 г.

Рассмотрены результаты статистического анализа локальных особенностей долговременного изменения облачного покрова над территорией Сибири, проведенного с использованием 45-летних (1969–2013 гг.) рядов метеорологических наблюдений 60 станций и данных климатического районирования этого региона по режиму общей и нижней облачности.

Установлено, что если во все сезоны в течение 45-летнего периода и в 1976–2005 гг., когда наблюдалось интенсивное глобальное потепление, имел место почти повсеместно слабо выраженный рост количества общей и нижней облачности (лишь в арктических районах Сибири преобладала тенденция к понижению количества общей и росту нижней облачности), то в 2006–2013 гг. при заметном ослаблении интенсивности этого потепления стало наблюдаться хорошо выраженное уменьшение, особенно зимой и весной, количества как общей, так и нижней облачности.

*Ключевые слова:* количество нижней и общей облачности, долговременные изменения, тренды, климатическое районирование, Сибирский регион; amount of total and lower cloudiness, long-term changes, trends, climatic zoning, Siberian region.

### Введение

Одной из важнейших проблем современной климатологии является проблема долговременных изменений глобального и регионального климата, где важную роль играет облачность — основной регулятор радиационных процессов, определяющих тепловой режим системы «земная поверхность — атмосфера» [1]. При этом режим облачного покрова, как и климат, подвержен долговременным изменениям, однако об их характере до настоящего времени еще не сложилось единого мнения. Так, например, если по данным одних исследователей долговременные изменения количества общей облачности во второй половине XX в. имели положительную тенденцию [2–5], а количества нижней облачности — отрицательную [4, 6, 7], то по данным других исследователей для того же периода характерны слабое уменьшение или незначительный тренд изменения общей облачности [8, 9] и увеличение количества нижней облачности [10, 11].

Такая неопределенность в большей степени связана с различиями в длине используемых (в разных публикациях) рядов метеорологических наблюдений, с наличием неоднородностей в этих рядах, вызван-

ных изменениями методики и сроков наблюдений, с отсутствием данных измерений облачности за последние годы и т.п. С одной стороны, исследование трендов долговременного изменения количества общей и нижней облачности, проведенное для территории России и разных ее регионов по данным отдельных (иногда единичных) станций (см., например, [2, 10, 11]), не позволяет выявить с необходимой достоверностью какие-либо закономерности такого изменения или полученные результаты (см. [12]) требуют их подтверждения на более полном статистическом материале. С другой стороны, использование пространственно-осредненных характеристик долговременного изменения количества общей и нижней облачности для больших территорий — например, европейской и азиатской частей России, как это сделано в [7], не позволяет выявить локальные особенности такого изменения в зависимости от физико-географических условий отдельных районов, расположенных в пределах этих территорий.

Одним из возможных выходов из сложившегося положения может быть использование подхода, основанного на учете результатов предварительного климатического районирования заданной территории, проведенного путем разбиения исходной пространственной области на совокупности односвязных и непересекающихся подобластей (в нашем случае однородных облачных районов — ООР), в пределах каждой из которых рассматриваемое

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

метеорологическое поле является локально однородным. При этом методика такого районирования может базироваться, как указано в [13], на идеях многомерного кластерного анализа и на использовании характеристик степени коррелированности информативных признаков классифицируемых метеорологических объектов.

По такому пути пошли и авторы настоящей статьи, воспользовавшись результатами климатического районирования территории Сибири по режиму облачного покрова, проведенного на основе оригинальной методики [14], в которой в качестве информативных признаков взяты среднесезонные значения и гистограммы распределения количества общей и нижней облачности по пяти градациям: 0, 1–3, 4–6, 7–9 и 10 баллов, а для выявления однородных облачных районов применен специальный критерий в виде критического значения характеристик степени коррелированности этих признаков. Рассчитав для каждого ООР характеристики долговременного изменения общей и нижней облачности, можно адекватным образом оценить их локальные особенности. О результатах такой оценки, проведенной для территории Сибири по данным наземных наблюдений, и пойдет речь ниже.

### Исходные данные и некоторые методические аспекты их обработки

Основным исходным материалом для исследования послужили 45-летние (1969–2013 гг.) ряды восьмисрочных наблюдений за количеством (баллы) общей облачности  $N$  и облаков нижнего яруса  $N_n$

(при высоте их нижней границы не более 2000 м), полученные для 60 метеорологических станций Сибирского региона из архива NOAA (<http://www.ncdc.noaa.gov/>). Однако общее число сибирских станций было существенно больше, но многие из них не были взяты из-за коротких и неоднородных рядов, что обусловлено прекращением на них наблюдений с конца 1980-х гг. или наличием большого количества пропусков. Кроме того, количество взятых реализаций для каждой из используемых станций составляло не менее 75% от их общего числа в месяц. Все это позволило при оценке долговременного изменения среднесезонного количества общей и нижней облачности брать в качестве исходных выборок достаточно длинные и полные ряды наблюдений, обладающие статистической однородностью.

Что касается самого исследования локальных особенностей долговременного изменения общей и нижней облачности с учетом результатов климатического районирования (примеры ООР для зимы, весны, лета и осени приведены на рис. 1), то оно основано на использовании постационных рядов погодичных значений среднесезонного количества этих видов облачности, полученных для трех периодов, а именно для 1969–2013 гг., взятого для оценки общей тенденции изменения облачного покрова за последние 45 лет, а также для 1976–2005 гг., в течение которого наблюдалось интенсивное глобальное потепление [9, 15], и 2006–2013 гг., когда проявилась явная тенденция к уменьшению интенсивности этого потепления или даже к похолоданию климата, причем не только в отдельных регионах, но и на всей территории Северного полушария [9, 16].

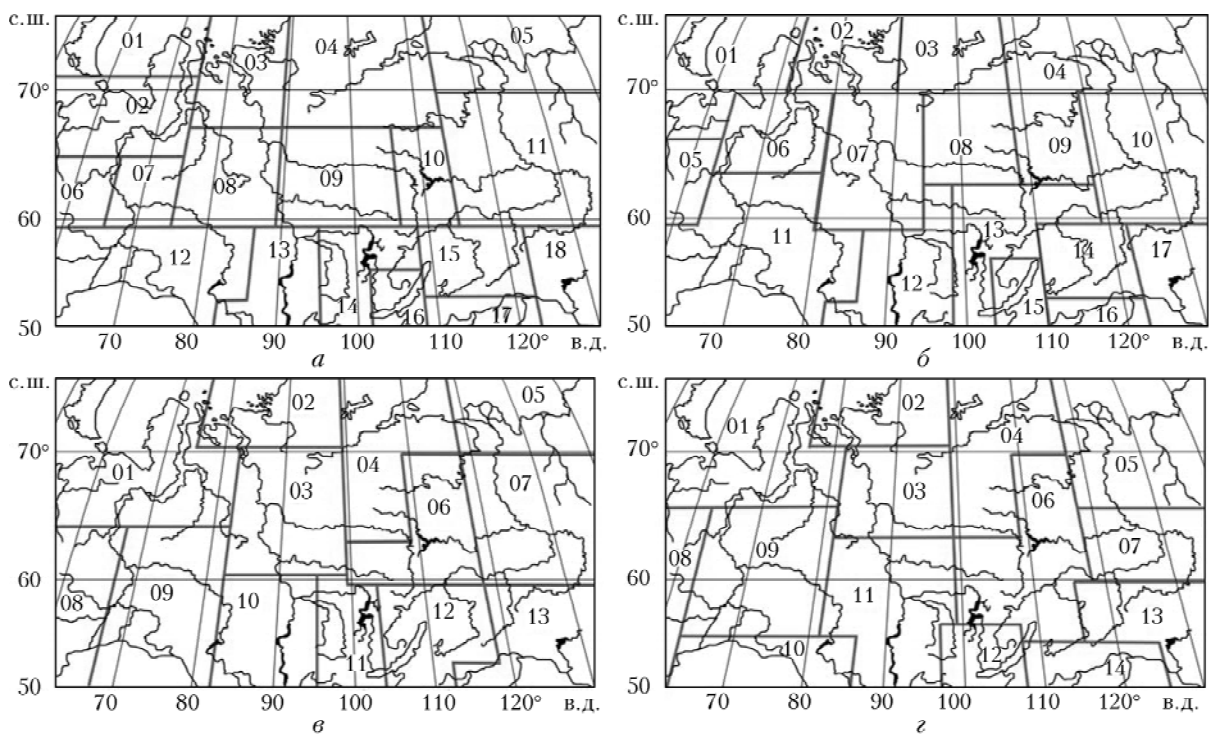


Рис. 1. Климатическое районирование территории Сибири по режиму общей и нижней облачности: а – зима; б – весна; в – лето; з – осень

А для выявления тенденций такого изменения взяты кривые межгодового хода, линейные тренды и величины их интенсивности (баллы/10 лет), полученные путем пространственного осреднения (в пределах каждого ООР) среднесезонных значений количества общей и нижней облачности, рассчитанных для каждого года трех периодов.

## Результаты исследования

Рассмотрим особенности долговременных изменений общей и нижней облачности, свойственных локальным однородным облачным районам Сибири. О характере этих изменений можно судить из рис. 2 и 3, где в качестве примера приведены кривые межгодового изменения среднесезонного количества общей и нижней облачности и соответствующие им линейные тренды, полученные для трех характерных ООР 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 таблицы, содержащей значения интенсивности трендов, рассчитанных для трех периодов (1969–2013, 1976–2005 и 2006–2013 гг.) и всех выявленных (при климатическом районировании территории Сибири) однородных облачных районов.

Проанализируем результаты оценки долговременных изменений среднесезонного количества общей и нижней облачности, и прежде всего данные, полученные для всего 45-летнего периода.

Анализ рис. 2 и 3 и данных таблицы показал, что для долговременных изменений среднесезонного количества общей и нижней облачности, оцененных для территории Сибири по данным всего периода (1969–2013 гг.), характерны определенные особенности, связанные с пространственным положением однородных облачных районов.

**Интенсивность (баллы/10 лет) линейных трендов пространственно-осредненных среднесезонных значений количества общей ( $\bar{N}$ ) и нижней ( $\bar{N}_n$ ) облачности за 1969–2013, 1976–2005 и 2006–2013 гг.**

Номер ООР	1969–2013		1976–2005		2006–2013	
	$\bar{N}$	$\bar{N}_n$	$\bar{N}$	$\bar{N}_n$	$\bar{N}$	$\bar{N}_n$
1	2	3	4	5	6	7
<i>Зима</i>						
01	–0,13	0,04	–0,08	0,18	–0,46	–0,27
02	–0,05	0,02	–0,14	0,05	–0,98	–0,56
03	–0,11	0,09	–0,42	0,05	–1,27	–0,15
04	–0,16	0,11	–0,20	0,21	–1,20	–0,86
05	–0,18	0,16	–0,31	0,02	–0,42	–0,99
06	0,21	0,12	0,35	0,04	–0,63	–1,30
07	0,52	0,43	0,58	0,72	–0,46	–1,90
08	0,01	0,01	0,11	0,06	–0,27	–0,45
09	0,16	0,15	0,15	0,18	–0,40	–0,36
10	0,18	0,16	0,17	0,33	–0,32	–1,19
11	0,20	0,00	0,15	0,09	–1,59	–0,51
12	0,14	0,05	0,23	0,23	–1,02	–2,21
13	0,02	0,09	0,06	0,05	–0,85	–1,22
14	0,07	0,08	0,10	0,13	–1,39	–1,51
15	0,01	0,03	0,12	0,14	0,74	0,47
16	0,02	0,01	0,06	0,02	0,06	0,20
17	0,13	0,20	0,08	0,02	1,59	1,33
18	0,08	0,12	0,05	0,17	0,06	1,40
<i>Весна</i>						
01	–0,03	0,02	–0,02	0,03	–0,03	–0,31
02	–0,24	0,02	–0,27	0,16	–0,39	–1,43
03	–0,03	0,07	–0,08	0,08	–0,03	–0,39
04	–0,03	0,23	–0,04	0,36	–0,19	–0,19
05	0,01	0,04	0,12	0,03	–0,36	–0,79
06	0,04	0,06	0,15	0,02	–0,04	–0,25
07	0,11	0,09	0,16	0,23	–0,79	–0,42
08	0,10	0,19	0,29	0,30	–0,81	–1,71
09	0,23	0,13	0,24	0,19	–0,26	–1,22
10	0,11	0,11	0,05	0,14	–1,21	0,46
11	0,11	0,08	0,04	0,08	–0,28	–0,17
12	0,04	0,05	0,06	0,03	–0,41	–0,04
13	0,06	0,11	0,08	0,11	–1,83	–0,85
14	0,05	0,07	0,08	0,07	0,22	1,21
15	0,05	0,04	0,07	0,13	0,95	0,29
16	0,06	0,17	0,06	0,13	0,37	1,04
17	0,05	0,13	0,08	0,21	0,10	0,63

1	2	3	4	5	6	7
<i>Лето</i>						
01	-0,02	0,02	-0,01	0,02	-0,47	-0,57
02	-0,03	0,01	-0,02	0,10	-0,75	-0,97
03	0,16	0,02	0,20	0,04	-0,68	-0,74
04	-0,04	0,02	-0,13	0,07	-0,33	-1,58
05	-0,07	0,04	-0,07	0,19	-1,59	-2,16
06	0,08	0,05	0,14	0,03	-0,77	-0,16
07	0,20	0,07	0,17	0,08	-1,95	-0,90
08	0,07	0,08	0,16	0,14	0,40	-0,07
09	0,12	0,13	0,04	0,07	0,38	-0,03
10	0,21	0,14	0,17	0,18	0,51	-0,14
11	0,02	0,08	0,01	0,07	0,53	-0,54
12	0,16	0,01	0,16	0,07	0,91	-0,12
13	0,04	0,22	0,09	0,11	0,70	-0,55
<i>Осень</i>						
01	-0,09	0,04	-0,07	0,04	-0,98	-1,02
02	-0,23	0,03	-0,20	0,08	-0,43	-0,12
03	0,17	0,04	0,12	0,18	-0,56	-1,01
04	-0,02	0,13	-0,03	0,10	-0,20	-0,06
05	-0,01	0,09	-0,10	0,21	-0,30	-0,32
06	0,13	0,15	0,22	0,22	-0,27	-0,65
07	0,34	0,18	0,33	0,18	-0,48	-0,86
08	0,20	0,16	0,15	0,04	1,27	2,25
09	0,17	0,15	0,07	0,13	1,88	1,66
10	0,18	0,08	0,09	0,04	1,51	1,14
11	0,15	0,12	0,15	0,13	1,42	1,62
12	0,13	0,20	0,12	0,12	0,79	1,83
13	0,16	0,25	0,10	0,21	1,67	2,27
14	0,20	0,20	0,14	0,11	2,13	2,64

В частности, если в данный период во все рассматриваемые сезоны в арктических районах Сибири (ООР 01–05 зимой, 01–04 весной; 01, 02, 04, 05 летом и осенью) преобладает явная тенденция к понижению количества общей и росту нижней облачности, то во всех остальных ООР, занимающих большую часть Сибирского региона, отмечается повсеместно рост количества обоих видов облачности. Правда, эти изменения количества общей и нижней облачности обладают малой интенсивностью.

Аналогичные особенности (понижение количества общей и рост нижней облачности в полярных районах Сибири и их повсеместное возрастание на ее остальной территории, причем в основном более интенсивное) отмечаются и в 1976–2005 гг., когда имело место интенсивное глобальное потепление. При этом выявленные особенности заметно отличаются от результатов, приведенных в [2–11], но подтверждают данные (правда, только для нижней облачности) нашей ранее опубликованной работы [12] и уточняют их для арктических районов Сибири.

Совершенно другие результаты получены для третьего периода (2006–2013 гг.), для которого характерно проявление явной тенденции к ослаблению интенсивности глобального потепления или даже к похолоданию климата.

Как следует из рис. 2 и таблицы, зимой и весной для данного периода характерно в основном (исключая соответственно ООР 15–18 и 14–17, расположенные в Забайкалье) преобладание отрицательных и значительных по величине трендов долговременного изменения количества общей и ниж-

ней облачности, причем их интенсивность в ряде однородных облачных районов может достигать  $-1,6 \div -1,8$  балла/10 лет для общей облачности (ООР 11, 17 зимой и 13 весной) и  $-1,7 \div -2,2$  балла/10 лет для нижней облачности (ООР 07, 12 зимой и 08 весной). Однако в летний и осенний сезоны есть свои особенности (рис. 3, таблица). Они проявляются, в частности, в том, что летом к югу от 60-й параллели, где находятся такие ООР, как 08–13, преобладают не отрицательные, а положительные тренды долгопериодного изменения количества общей облачности. В то же время для количества нижней облачности в этот сезон сохраняется тенденция его повсеместного уменьшения. Осенью же в однородных облачных районах 01–07, расположенных в полярных широтах, отмечается снижение количества общей и нижней облачности, а в умеренных широтах (ООР 08–14), наоборот, их рост.

Здесь следует подчеркнуть, что выявленный над территорией Сибири переход положительных трендов изменения общей и нижней облачности, наблюдаемых в 1976–2005 гг., к отрицательным трендам их изменения в 2006–2013 гг. обусловлен в значительной степени колебаниями циркуляции атмосферы над Сибирским сектором в конце XX – начале XXI в. (вплоть до 2012 г. включительно), когда согласно [17] здесь произошла смена широтной западной циркуляции, играющей главную роль в 80–90-х гг., на долготную северную в современный период. Это способствовало уменьшению количества облачности и, следовательно, понижению температуры воздуха в холодный период года.

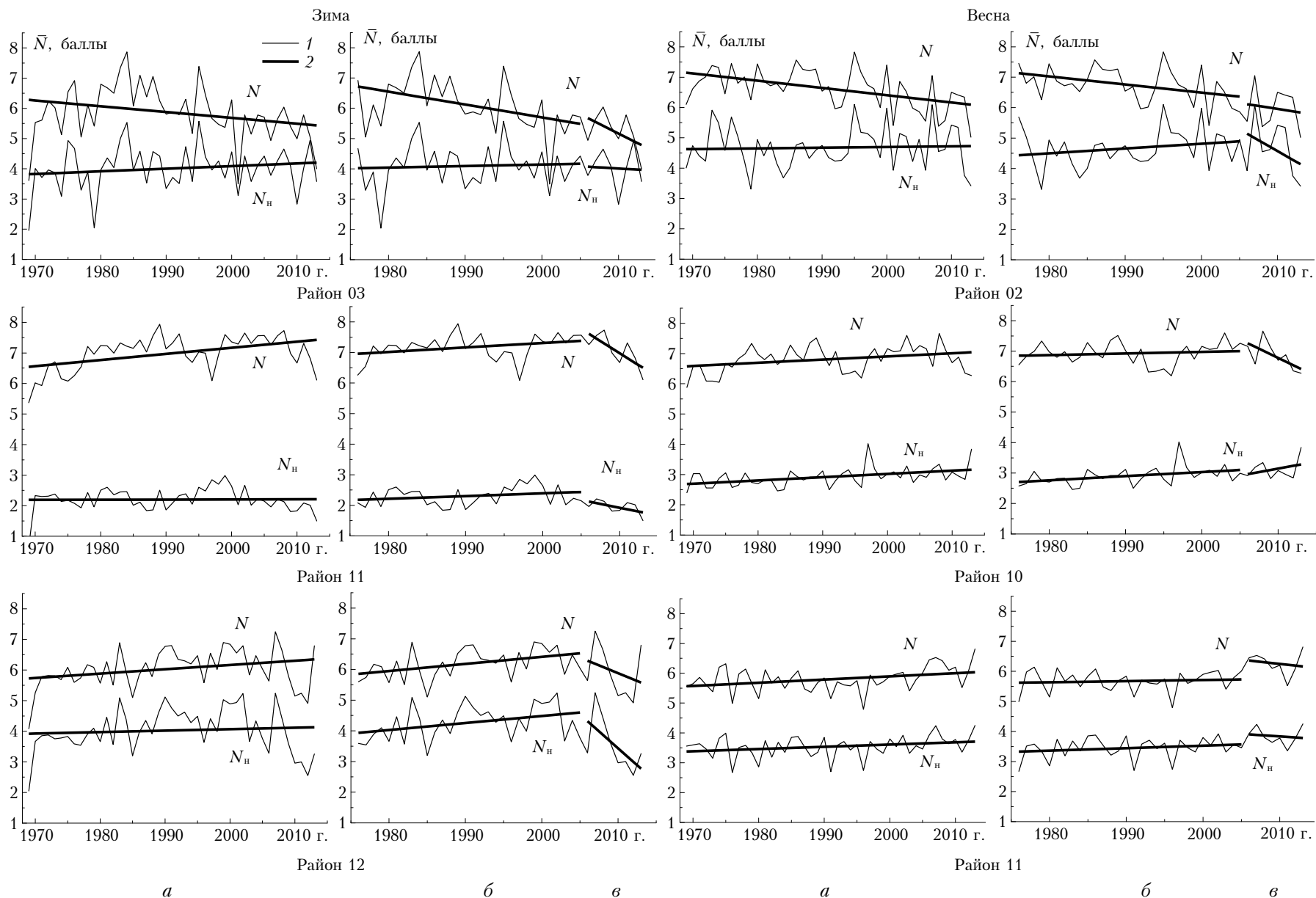


Рис. 2. Долгопериодные изменения среднесезонного количества общей ( $N$ ) и нижней ( $N_{н}$ ) облачности (1) и их линейные тренды (2), полученные по данным 1969–2013 (а), 1976–2005 (б) и 2006–2013 гг. (в) для различных однородных облачных районов. Зима и весна

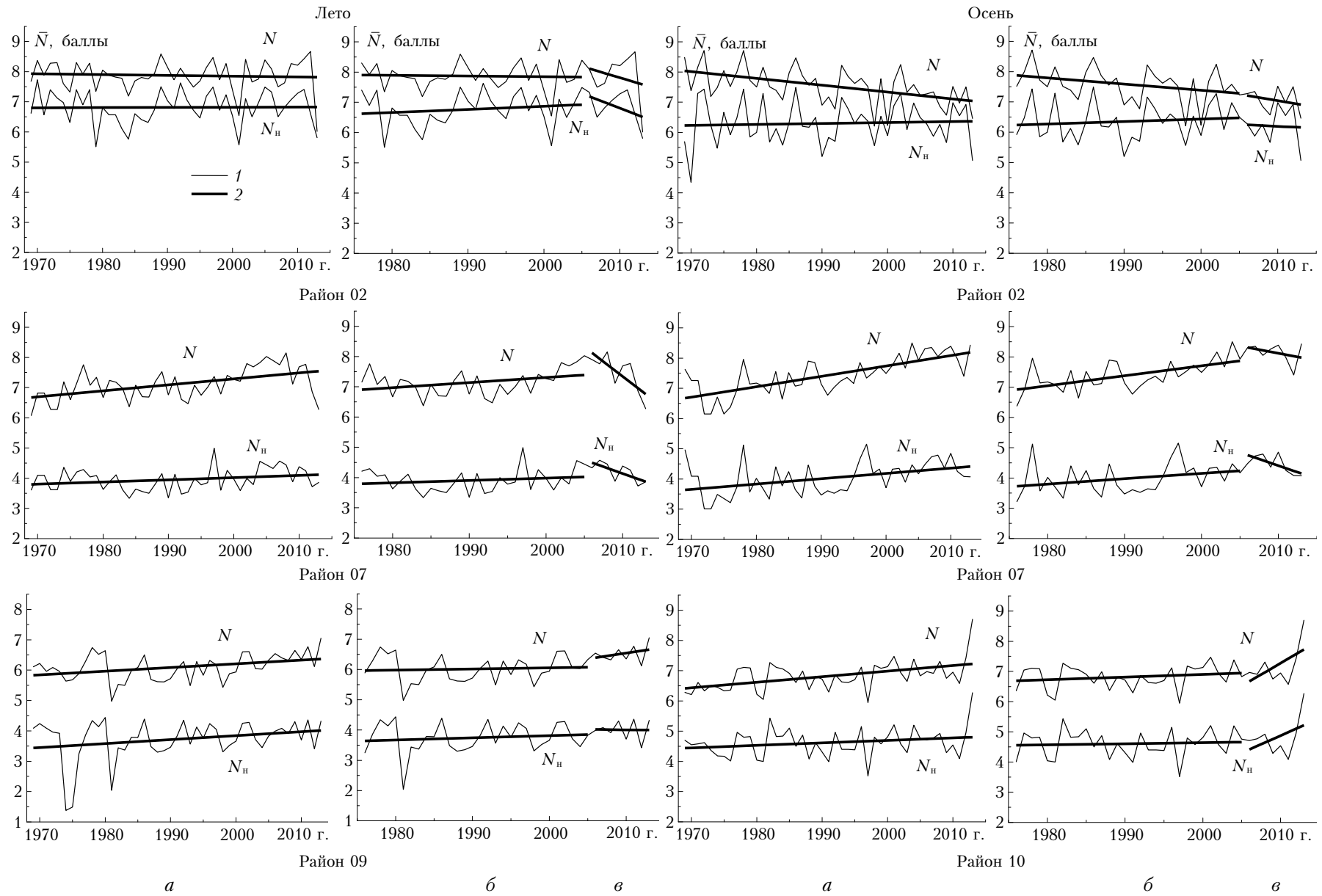


Рис. 3. Долгопериодные изменения среднесезонного количества общей ( $N$ ) и нижней ( $N_{\text{н}}$ ) облачности (1) и их линейные тренды (2), полученные по данным 1969–2013 (а), 1976–2005 (б) и 2006–2013 гг. (в) для различных однородных облачных районов. Лето и осень

Кроме того, полученные для третьего периода (2006–2013 гг.) результаты существенным образом уточняют выводы [12], относящиеся к трендам долговременного изменения количества нижней облачности, рассчитанным по данным только 25 сибирских станций.

### Заключение

Таким образом, проведенный для Сибирского региона анализ долговременных изменений облачного покрова с использованием результатов климатического районирования его территории по режиму общей и нижней облачности позволяет сделать общий вывод о том, что во все сезоны в течение всего 45-летнего периода и в 1976–2005 гг., когда наблюдалось интенсивное глобальное потепление, имел место почти повсеместно слабо выраженный рост количества общей и нижней облачности (лишь в арктических районах Сибири преобладала тенденция к понижению количества общей и росту нижней облачности). В то же время в 2006–2013 гг. при заметном ослаблении интенсивности глобального потепления уже преобладает, особенно зимой и весной, не рост, а хорошо выраженное понижение количества как общей, так и нижней облачности.

1. Кондратьев К.Я., Биненко В.И. Влияние облачности на радиацию и климат. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 240 с.
2. Байкова И.М., Ефимова Н.А., Строккина Л.А. Современное изменение облачного покрова над территорией России // Метеорол. и гидрол. 2002. № 9. С. 52–61.
3. Dai A., Karl T.R., Sun B., Trenberth K.E. Recent trends in cloudiness over the United States: A tale of monitoring inadequacies // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2006. V. 87, N 5. P. 597–606.
4. 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. 1003–1017.
5. Eastman R., Warren S.G. Arctic Cloud Changes from Surface and Satellite Observations // J. Climate. 2010. V. 23, N 15. P. 4233–4242.
6. Sun B.M., Groisman P.Ya. Variations in low cloud cover over the United States during the second half of

the twentieth century // J. Climate. 2004. V. 17, N 9. P. 1883–1888.

7. Хлебникова Е.И., Салль И.А. Особенности климатических изменений облачного покрова над территорией России // Метеорол. и гидрол. 2009. № 7. С. 5–13.
8. Warren S.G., Eastman R.M., Hahn C.J. A survey of changes in cloud cover and cloud types over land from observations. 1971–96 // J. Clim. 2007. V. 20, N 4. P. 717–738.
9. Переведенцев Ю.П. Теория климата. Казань: Изд-во КГУ, 2009. 504 с.
10. Абакумова Г.М. Тенденция многолетних изменений прозрачности атмосферы, облачности, солнечной радиации и альbedo подстилающей поверхности в г. Москве // Метеорол. и гидрол. 2000. № 9. С. 51–62.
11. 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. 880–888.
12. Комаров В.С., Ильин С.Н., Лавриненко А.В., Ломакина 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.
13. Калинина В.Н., Соловьев В.И. Введение в многомерный статистический анализ. М.: Изд-во гос. ун-та управления, 2003. 66 с.
14. 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 атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 10. С. 895–898.
15. Шерстоков Б.Г. Изменение, изменчивость и колебания климата. Обнинск: Изд-во ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2011. 293 с.
16. Шерстоков Б.Г., Салугашвили Р.С. Новые тенденции в изменениях климата северного полушария Земли в последнее десятилетие // Тр. ГУ «ВНИИГМИ-МЦД». 2010. Вып. 175. С. 43–51.
17. Кононова Н.К. Сезонные особенности колебаний циркуляции атмосферы Сибирского сектора Северного полушария в XX–XXI веках // Тез. Рос. конф. «X Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу» / Под ред. М.В. Кабанова. Томск: изд-во АГРАФ ПРЕСС, 2013. С. 72–73.

#### **V.S. Komarov, G.G. Matvienko, S.N. Il'in, N.Ya. Lomakina. Evaluation of local features of long-term changes in cloud cover over the territory of Siberia from results of climatic zoning according to total and low cloudiness conditions.**

The statistical analysis results of the local features of long-term changes in cloud cover over the territory of Siberia realized using 45-year (1969–2013) series of meteorological observations of 60 stations and data of the climatic zoning of the region according to total and lower cloudiness conditions are shown.

It has been found that a weak growth of the amount of total and lower cloudiness took place almost everywhere (except Arctic regions of Siberia, where the tendencies to decrease in total clouds and to increase in lower ones were dominated) during all seasons for 45-year period and from 1976 to 2005, during intense global warming, while from 2006 to 2013, when the intensity of this warming became much weaker, well marked decrease in both the total and lower cloudiness was observed especially in winter and spring.