

ПРОГНОЗ ОСАДКОВ СО СТАТИСТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИЕЙ МОДЕЛИ COSMO-RU7

А.Е. Никифорова, Б.Е. Песков

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации;
lince@yandex.ru*

Введение

Ранее в результате исследований [3, 4] наметились тенденции повышения качества прогнозов осадков по модели COSMO-Ru7 за счет их статистической коррекции. В данной работе продолжается статистическое уточнение прогнозов осадков на еще большем объеме данных с применением повышения степени соотношений (от первой ко второй и третьей):

$$y=a_1x + d_1, \tag{1}$$

$$y=a_2x + b_2x^2 + d_2, \tag{2}$$

$$y=a_3x + b_3x^2 + c_3x^3 + d_3. \tag{3}$$

Коэффициенты $a_1, d_1, a_2, b_2, d_2, a_3, b_3, c_3, d_3$ получены соответствующим стандартным регрессионным анализом из соотношений фактических осадков (y) в мм/12ч на метеостанции за текущий день и прогностических осадков (x) по модели COSMO-Ru7 за тот же период времени.

Использовались данные о фактических осадках с метеорологических станций, расположенных на ЕТР (45–62° с. ш., 30–55° в. д.) и прогнозы осадков по COSMO-Ru7 по той же территории за теплый (май – сентябрь) и холодный (декабрь – март) периоды 2010–2013 годов.

1. Регрессия и корреляция первой степени

В табл. 1 приведены значения коэффициентов регрессии, свободных членов и коэффициентов корреляции в линейном соотношении (1) фактических осадков (мм/12ч) с прогностическими.

Таблица 1

Коэффициенты регрессии (a_1), свободные члены (d_1) и коэффициенты корреляции (r_1) в линейном соотношении (1)

Период года	a_1	d_1	r_1
Холодный (декабрь – март)	0,658	0,095	0,675
Май и сентябрь	0,532	0,408	0,482
Лето (июнь – август)	0,450	0,693	0,364

Из данных табл. 1 видно, что от холодного периода года к периоду теплого периода коэффициенты регрессии и коэффициенты корреляции падают, а свободный член растет. Это означает уменьшение качества прогнозов от зимы к лету:

– коэффициент регрессии a_1 : доля фактических осадков в прогностических в среднем отличается от 1 (100 %) на 0,34; 0,47; 0,55, т. е. закономерно падает от 0,66 до 0,45 (от 66 до 45 %), на 3 % каждый месяц, 21 % в целом;

– свободный член d_1 : осадки в среднем растут при прогнозе их отсутствия (0 мм), т. е. ошибочный прогноз также закономерно растет от 0,1 до 0,4 и 0,7 мм/12 ч (увеличивается в целом в 7 раз);

– коэффициент корреляции r_1 : близость безошибочных прогнозов к 1 (100 %) закономерно уменьшается от 0,68 до 0,48 и 0,36 (в целом на 0,32, т. е. уменьшается на 5 % в месяц, 32 % в целом).

Положительная величина коэффициентов a_1 и d_1 во все сезоны означает, что при больших расхождениях между фактическими и прогностическими осадками на отдельной станции и в отдельный день в целом по мере роста прогностических осадков наблюдается прямая зависимость между прогностическим и фактическим количеством осадков, т. е. имеет место правильная тенденция прогнозирования, но величина фактических осадков начиная с прогноза $\geq 1,5$ мм завышена примерно на 2 мм, при прогнозе 10 мм – на

5 мм, 20 мм – на 10 мм. Завышение летом примерно в 1,5 раза больше, чем в холодный период. Показатель качества прогнозов r_1 летом почти в 2 раза меньше. Это связано с известным увеличением летом по сравнению с зимой турбулизованных кучево-дождевых облаков Сб и потерей части их энергии и влаги на испарение, явно недоучитываемой моделью.

Хорошо известно, что от зимы к середине лета растут температура и абсолютная влажность у земли, где зарождаются и, соответственно, усиливаются конвективные струи в Сб, вертикальный градиент температуры, ускоряющий эти струи; выделение скрытой теплоты конденсации, усиливающей это ускорение; увеличиваются высота и мощность облака, турбулентность, вовлечение в Сб сухого холодного окружающего воздуха, потеря энергии и влаги при испарении. Следовательно, от зимы к лету растет как величина осадков, так и потеря их, недоучитываемая моделью и подправляемая в среднем статистикой. Надежность последней обусловлена исключительно большим объемом многолетних данных и подтверждением физических процессов, четко обусловленных годовым ходом, от пика теплого периода к маю и сентябрю и к холодному периоду.

2. Регрессия и корреляция второй степени

В табл. 2 приведены параметры квадратического соотношения (2).

Таблица 2

Коэффициенты регрессии (a_2 , b_2), свободные члены (d_2) и корреляционные отношения (r_2) по сезонам года в соотношении (2)

Период года	a_2	b_2	d_2	r_2
Холодный (декабрь – март)	0,71	-0,0077	0,081	0,68
Май и сентябрь	0,70	-0,0088	0,396	0,50
Лето (июнь – август)	0,68	-0,0097	0,602	0,41

Из сравнения данных табл. 1 и 2 видно, что годовой ход линейного коэффициента уменьшается с 3 % в месяц (a_1) до 0,5 % (a_2), т. е. в 7 раз (от 0,21 до 0,03).

На рис. 1 показан пример характерной для середины лета регрессионной связи фактических дневных осадков (y) с прогнозами на текущий день (x) по соотношениям (1) – (3).

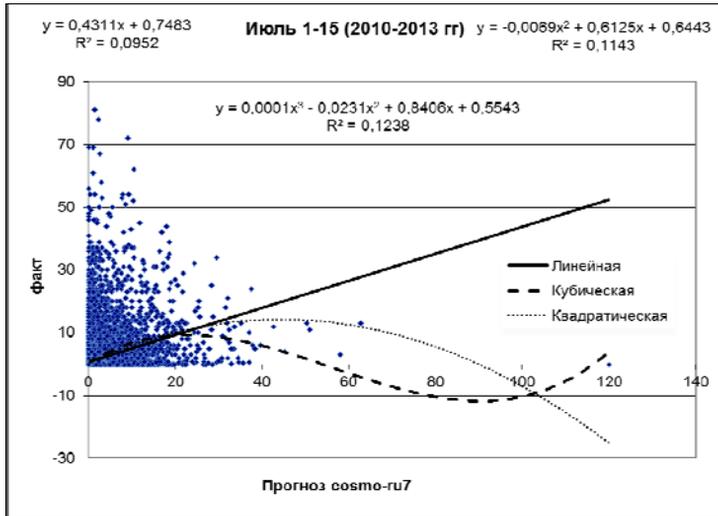


Рис. 1. Пример характерной в середине лета регрессионной связи фактических дневных осадков (y) с прогнозами на текущий день (x) в мм/12ч по соотношениям первой, второй и третьей степени.

Из рис. 1 видно, что при прогнозах небольших и умеренных осадков (до 10–15 мм) наибольшую роль играет линейный член. При прогнозах сильных осадков (до 20–30 мм) еще больше растет квадрат x в уравнении. Поэтому именно квадратический член b_2x^2 становится главным (как и кубический c_3x^3 в соотношении третьей степени) при очень сильных осадках от 30 до 70 мм.

Из рис. 1 и табл. 2 видно, что при прогнозах осадков количеством до 10 мм по квадратическому соотношению ослабление осадков практически сводится к нулю, несмотря на растущую летом конвекцию. Но годовой ход остальных параметров при сильных осадках остается и в квадратическом соотношении: корреляционное отношение r_2 в уравнении (2) уменьшается летом в 1,5 раза из-за сохранения, как и в линейном соотношении (1),

ухудшения прогнозов сильных осадков. Остается почти неизменным, по сравнению с данными табл. 1, увеличение летом в 6 раз и свободного члена (увеличение с 0,1 до 0,6 средней величины фактических осадков при прогнозе 0 мм).

Второй, главный коэффициент b_2 при x^2 резко сокращает неверное сильное завышение модельными прогнозами сильных осадков дополнительно к сокращению их на 30 % линейным коэффициентом a_2 . Причем сокращает на 30 % больше летом, чем в холодный период (табл. 2).

Из данных табл. 3 видно сильное сокращение прогностических осадков при прогнозе более 30–40 мм: скорректированный прогноз дает не рост, а даже сокращение осадков (с 12,3 до 10,4 мм), при прогнозе осадков количеством более 50 мм – практически до нуля.

Таблица 3

Величина сокращения летом прогностических осадков x (мм/12ч) в соотношении (2)

Прогноз x	Сокращение b_2x^2	Сокращение $a_2x + b_2x^2$	Скорректированный прогноз
10	-1,0	-4,0	6,6
20	-3,9	-10,3	10,3
30	-8,7	-18,3	12,3
40	-15,5	-28,3	12,3
50	-24,2	-40,2	10,4

Такая резкая корректировка прогностических осадков ($r_1=0,36$ в табл. 1, $r_2=0,41$ в табл. 2) означает, что при условиях, благоприятных для выпадения сильных осадков, моделью недоучтено увеличение потерь осадков из кучево-дождевого облака по мере увеличения роста вертикальной неустойчивости, конвективной турбулентности, вовлечения в C_b окружающего облака холодного сухого воздуха и испарения.

Однако число случаев очень сильных осадков статистически недостаточно. Поэтому более надежные выводы дает кубическое соотношение (3).

3. Регрессия и корреляция третьей степени

В табл. 4 приводятся параметры кубического соотношения (a_3 , b_3 , c_3 , d_3 , r_3) для лета, а также для мая и сентября. Зимний период не приводится, так как очень сильные осадки в рассматриваемый период практически отсутствовали.

Таблица 4

Коэффициенты регрессии (a_3 , b_3 , c_3), свободные члены (d_3), и корреляционные отношения (r_3) в соотношении (3)

Период	a_3	b_3	c_3	d_3	r_3
Май и сентябрь	0,832	-0,0255	0,0003	0,380	0,496
Лето (июнь – август)	0,815	-0,0223	0,0002	0,518	0,395

Из данных табл. 4 видно, что для соотношения третьего порядка в более теплый период (июнь – август) по сравнению с менее теплым (май, сентябрь), как и в соотношениях первого и второго порядка (табл. 1 и 2), меньше как качество прогнозов (r_3), так и коэффициент при линейном члене (a_3). Это говорит о том, что завышенное влияние большой конвективной неустойчивости не устраняется полностью. Дальнейшее повышение степени соотношений (с третьей до четвертой) невозможно, так как даже 10000 случаев недостаточно для надежных выводов с малым числом случаев (порядка 100) осадков 50–100 мм.

Коэффициенты b_3 и c_3 при x^2 и x^3 «отвечают» за сильные и очень сильные осадки. Эти коэффициенты уменьшаются летом по сравнению с маем и сентябрем, что говорит о невозможности уточнения прогноза сильных осадков этим соотношением. Отсутствует и рост качества прогнозов (в табл. 4 по сравнению с табл. 2). Но остается рост летом свободного члена, «отвечающего» за прогноз без осадков, хотя он и несколько меньше (на 0,1–0,2 мм) по сравнению с соотношениями меньшего порядка (табл. 1 и 2).

Главным в табл. 4 является противоположный знак коэффициентов при x^2 и x^3 . Это означает уменьшение излишней корректировки прогностических осадков квадратичным членом противоположной корректировкой кубическим для прогнозов сильных и очень сильных осадков.

Очевидно, потеря осадков при сильной конвекции сокращается в случаях перехода отдельных кучево-дождевых облаков в мезомасштабные конвективные комплексы [9].

В табл. 5 приведены данные о влиянии суммы членов $b_3x^2 + c_3x^3$ и скорректированные прогностические осадки с учетом всех членов соотношения (3) летом.

Таблица 5

Модельные прогнозы осадков летом в мм/12ч, их коррекция суммой двух и всех членов соотношения (3)

Прогноз осадков по модели x , мм/12ч	Сокращение ($b_3x^2 + c_3x^3$)	Скорректированный прогноз, y
5	-0,6	3,9
10	-2,2	6,3
20	-7,3	9,0
30	-14,7	9,5
40	-22,8	9,7
50	-30,3	9,7
60	-37,1	10,9
70	-40,2	15,8

Из данных табл. 5 видно, что с увеличением прогностических осадков сокращение их суммарным влиянием членов x^2 и x^3 сначала быстро увеличивается, но при прогнозе очень сильных осадков почти не меняется. Все это происходит за счет роста турбулентности в кучево-дождевом облаке при прогнозе осадков до 40 мм и уменьшением ее в центре мезомасштабного конвективного комплекса при прогнозе осадков более 60 мм.

Суммарное сокращение осадков всеми членами соотношения (3) таково, что скорректированные осадки растут более медленно вместе с прогностическими. Но рост практически прекращается при модельных осадках от 30 до 50 мм и вновь увеличивается при $x \geq 70$ мм. В соотношении второй степени (табл. 3) рост тоже останавливается на осадках от 30 до 40 мм и даже падает при $x \geq 50$ мм. В целом, очевидно, рост скорректированных осадков практически

останавливается при $x > 30$ мм. Более сильные фактические осадки, как показано в [5], выпадают при модельном прогнозе менее сильных. Когда моделью прогнозируются осадки от 10 до 15 мм, фактически выпадает любое количество осадков.

Суммарно соотношение третьей степени уменьшает турбулентное сокращение прогноза очень сильных осадков по сравнению с соотношением второй степени. Фактически наблюдается следующая зависимость: при прогнозе по модели осадков количеством 20–70 мм фактически на метеостанции наблюдается от 10 до 15 мм осадков; при $x > 70$ мм скорректированный прогноз не надежен из-за статистически недостаточного для соотношения третьей степени числа таких случаев. Поэтому обосновано корректировать прогнозы по соотношению третьей степени (3) модельных прогнозов до 70 мм. Они достаточно точно аппроксимируются в лето более простым соотношением:

$$y = 0,6x \text{ при } x \text{ от } 1 \text{ до } 14 \text{ мм;}$$

$$y = 2,2\sqrt{x} \text{ при } x \geq 15 \text{ мм.}$$

4. Сравнительный анализ параметров регрессии для соотношений первого, второго и третьего порядков

В табл. 6 представлены коэффициенты регрессии a_1 , a_2 , a_3 при линейном члене x в соотношении первой, второй и третьей степени в теплый период года.

Таблица 6

Коэффициенты регрессии a_1 , a_2 , a_3 в соотношениях (1) – (3)

Период	a_1	a_2	$a_2 - a_1$	a_3	$a_3 - a_2$
Май и сентябрь	0,53	0,70	0,17	0,83	0,13
Лето (июнь – август)	0,45	0,68	0,23	0,82	0,14
Изменение от периода к периоду	-0,08	-0,02		-0,01	

Из данных табл. 6 видно, что доля фактических осадков в прогностических (a_1 , a_2 , a_3) закономерно растет от a_1 к a_2 и от a_2 к a_3 как летом, так и в мае и сентябре, но рост уменьшается по мере повышения степени соотношения. Это означает, что растет в среднем

(с уменьшением роста) качество прогнозов небольших и умеренных осадков (от 2 до 10 мм) за счет оптимального сокращения преувеличенных прогнозов сильных осадков. Уменьшается с -0,08 до -0,02 и до -0,01 сокращение доли правильно спрогнозированных таких осадков от мая и сентября к лету, т. е. по мере усиления конвекции. Последнее означает, что недоучтенное моделью сокращение прогностических осадков конвекцией летом статистическими соотношениями второй и третьей степени минимизируется в среднем до нуля в зоне прогнозов небольших и умеренных осадков. Остающееся требуемое улучшение прогнозов на 17–18 % (от 0,82–0,83 до 1, или от 82–83 % до 100 %) соотношениями даже третьей степени не происходит, так как причина лежит, как видно из годового хода, уже не в конвекции, а в других факторах, в частности не в вертикальной, а в горизонтальной неустойчивости, связанной с горизонтальным ветром, в испарении, зависящем от относительной влажности воздуха и влажности подстилающей поверхности, имеющих более сложный годовой ход и изменение с севера на юг Европейской территории России. Влияние этих факторов проявляется в меньшей степени, поэтому в данной статье не излагается.

В табл. 7 представлены коэффициенты при x^2 в соотношениях второй и третьей степени.

Таблица 7

Коэффициенты b_2 и b_3 при x^2 в соотношениях (2) и (3)

Период	b_2	b_3	$b_3 - b_2$
Май и сентябрь	-0,0088	-0,0255	-0,0167
Июнь, июль, август	-0,0092	-0,0223	-0,0131
Изменение от периода к периоду	-0,0004	0,0032	0,0036

Из данных табл. 7 видно, что сокращение сильных осадков членом с x^2 больше в соотношении третьей степени, чем во второй. Это означает, что в зоне надежных прогнозов сильных осадков (15–30 мм) имеет место более сложная закономерность, чем параболическая. Усиливается разница сокращения сильных осадков

конвекцией от $-0,0004$ для b_2 и до $0,0032$ (в 2,5 раза) для b_3 . Из этого следует, что чем сильнее конвекция, тем больше отличается от параболической ее влияние на сокращение сильных осадков: в кубическом соотношении оно становится заметно больше, но летом, с ростом до максимума конвекции, оно уменьшается. И, как видно из табл. 4, осадки компенсируются членом c_3x^3 в меньшей степени. Это означает, что летом при максимальной конвекции изменение осадков ею в целом меньше.

Все это происходит по упомянутой выше причине более частого формирования МКК (комплексов Сb) при особо сильной конвекции летом, при котором сокращение сильных и очень сильных осадков уменьшается. Такая тенденция проявляется в более сложном соотношении третьей степени еще в зоне достаточно большого числа случаев перехода от умеренных к сильным осадками. Иными словами, из данных табл. 7 следует, что летом с ростом конвективных осадков и конвективно-турбулентных их потерь усложняется соотношение фактических и прогностических осадков с сокращением потерь в зоне прогноза перехода сильных осадков в очень сильные за счет формирования мезомасштабных конвективных комплексов вместо небольших разрозненных кучво-дождевых облаков (Сb).

В табл. 8 представлены свободные члены d_1 , d_2 , d_3 в соотношениях первой, второй и третьей степени.

Таблица 8

Свободные члены d_1 , d_2 , d_3 в соотношениях (1) – (3)

Период	d_1	d_2	$d_2 - d_1$	d_3	$d_3 - d_2$
Май и сентябрь	0,41	0,40	-0,04	0,38	-0,02
Лето (июнь – август)	0,69	0,60	-0,09	0,52	-0,08
Изменение от периода к периоду	0,28	0,20		0,14	

Из данных табл. 8 видно закономерное уменьшение по мере увеличения степени от первой к третьей соотношения ошибочного прогноза отсутствия осадков, особенно летом (в среднем почти на 0,2 мм). Это означает повышение качества прогноза в целом

по мере повышения степени соотношения летом при максимальной конвекции, резко сокращающей это качество. Сокращается от 0,28 до 0,20 и до 0,14 мм и рост ошибки прогноза без осадков от менее теплого периода лета к наиболее теплому с максимальной конвекцией, ухудшающей прогноз.

В табл. 9 представлены коэффициенты корреляции r_1 и корреляционные отношения r_2 , r_3 в соотношениях первой, второй и третьей степени.

Таблица 9

Коэффициенты корреляции r_1 и корреляционные отношения r_2 , r_3 в соотношениях (1) – (3)

Период	r_1	r_2	$r_2 - r_1$	r_3	$r_3 - r_2$
Май и сентябрь	0,48	0,50	0,02	0,50	0,00
Лето (июнь – август)	0,36	0,41	0,05	0,40	-0,01
Изменение от периода к периоду	-0,12	-0,09		-0,10	

Из данных табл. 9 видно, что качество прогнозов растет от r_1 к r_2 при увеличении степени соотношения с первой до второй и перестает расти в соотношении третьей степени. Это означает явную полезность соотношения второй степени и сомнительность дополнительного выигрыша в соотношении третьей степени. Но выигрыш соотношения третьей степени по существенному уменьшению d_3 (табл. 8) – ошибки прогноза небольших осадков, близких к нулю, – свидетельствует о ненадежности прогноза очень сильных осадков из-за недостатка случаев и повышенной сложности физики. Поэтому, как говорилось ранее, все прогнозы сильных и очень сильных осадков характеризуются лишь схематически одним числом и словом: ≥ 15 мм – сильные.

Уменьшение качества прогнозов во всех соотношениях сохраняется порядка -0,1 (-10 %) в середине теплого периода. Учитывая физически обоснованную корректировку прогнозов третьей степени в зоне достаточно большого числа случаев не очень сильных осадков полезность соотношения третьей степени для них не вызывает сомнений.

Заключение

Статистическая корректировка прогнозов осадков по Европейской территории России на текущий день на большом многолетнем материале для теплого и частично для холодного периодов года дает существенный выигрыш по сравнению с базовыми прогнозами по модели COSMO-Ru7, существенно уменьшая ожидаемые осадки, тем больше, чем больше их величина. В разрабатываемых соотношениях прогностических осадков (x) с фактическими (y) в виде $y=a_1x + d_1$, $y=a_2x + b_2x^2 + d_2$, $y=a_3x + b_3x^2 + c_3x^3 + d_3$ все коэффициенты регрессии a_1 , a_2 , a_3 , b_2 , b_3 , c_3 , свободные члены d_1 , d_2 , d_3 коэффициент корреляции r_1 и корреляционные отношения r_2 , r_3 подтверждены физически обоснованными годовым ходом и достаточной статистической надежностью в зоне прогнозов небольших, умеренных и сильных осадков до 20–40 мм.

Главным результатом работы является выявление недоучета моделью значительных потерь осадков с ростом их конвективной составляющей, особенно летом по сравнению с маем, сентябрем и холодным периодом.

Осадки середины теплого периода в среднем (с наименьшей средней квадратической ошибкой) растут как $y=0,6x$ до $x=14$ мм. При $x > 14$ мм рост y практически прекращается. Эта аппроксимация получена из более точного соотношения третьей степени при статистически достаточном числе случаев в зоне прогнозов до 50 мм.

Прогноз по этому соотношению дает надежно среднюю величину осадков в радиусе 25 км, которая вплоть до $x=47$ мм не бывает более 15 мм. Точечные, местами (на 5–10 % территории) сильные осадки >15 мм и очень сильные на 1–4 % территории (≥ 30 мм/ч и ≥ 50 мм/12ч) даются [5] в основном без статистической корректировки по модели COSMO-Ru7, но по максимальной величине, ожидаемой в районе радиусом 150 км; они ожидаются, естественно, не в прогностической точке, а где-то на малой площади («местами», «точечно» «на 1–10 % территории») радиусом 50–100 км.

Потеря осадков в кучево-дождевом облаке увеличивается с ростом их прогностической величины. Нарастание этой потери

уменьшается из-за формирования единых крупных мезомасштабных конвективных комплексов.

Список использованных источников

1. Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного прогноза погоды Гидрометцентра России: первый этап реализации и развития // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 8. – С. 5–20.

2. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М., Алферов Д.Ю., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Казакова Е.В., Кирсанов А.А., Никитин М.А., Перов В.Л., Суркова Г.В., Ревокатова А.П., Шатунова М.В., Чумаков М.М. Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: второй этап реализации и развития // Метеорология и гидрология. – 2015. – № 6. – С. 58–70

3. Песков Б.Е. Влияние различных термодинамических и синоптических условий на развитие гроз и ливней // Труды ЦИП. – 1966. – Вып. 149. – С. 46–58.

4. Песков Б.Е., Алексеева А.А., Никифорова А.Е. Усовершенствование метода прогноза летних осадков // Метеорология и гидрология. – 2008. – № 10. – С. 52–60.

5. Никифорова А.Е., Песков Б.Е. Прогноз летних дождей с использованием результатов постпроцессинга прогнозов осадков COSMO-Ru7 // Труды Гидрометцентра России. – 2014. – Вып. 351. – С. 5–22.

6. Песков Б.Е., Дмитриева Т.Г. Уточнение мезомасштабного численного прогноза сильных ливней // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 9. – С. 5–16.

7. Песков Б.Е. Расчет максимальной высоты верхней границы кучево-дождевых облаков с учетом вовлечения в различных синоптических условиях // Труды ВГИ. – 1968. – Вып. 11. – С. 109–119.

8. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 568 с.

9. Вельтищев Н.Ф., Степаненко В.М. Мезометеорологические процессы. – М.: Географический факультет МГУ, 2007. – 126 с.

Поступила в редакцию 03.02.2017 г.