

ТЕХНОЛОГИЯ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ПЕРИОДОВ ВЫПАДЕНИЯ ОСАДКОВ ДЛЯ САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

С.В. Морозова

*Саратовский государственный университет
swetwl@yandex.ru*

Саратовская область относится к сельскохозяйственным регионом России, поэтому для ее территории особенно важна информация об ожидаемых погодных условиях месяцев вегетационного периода, особенно об атмосферных осадках, так как именно они в условиях сухостепного климата являются лимитирующим фактором произрастания сельскохозяйственных культур. Наиболее разработанными и официально применяемыми методами долгосрочного прогноза осадков является прогнозирование среднемесячного количества осадков в процентах по отношению к норме. Однако при одном и том же месячном количестве осадков их распределение внутри месяца может быть совершенно различным. Поэтому заблаговременная информация о периодах выпадения осадков представляет большой интерес для потребителя, тем более что с увеличением степени засушливости климата и возрастающей нестабильностью атмосферных условий сельхозпроизводителям требуются все более точные, с наибольшей степенью детализации и максимально возможной заблаговременностью прогнозы.

В настоящей статье представлена разработка по долгосрочно-му прогнозированию периодов выпадения осадков на срок до двух месяцев с указанием ожидаемых дат их выпадения. Технология составления прогноза разработана на основе применения синоптико-статистической модели. В основу модели заложены физические закономерности, открытые и обоснованные проф., докт. физ.-мат. наук В.Ф. Мартазиновой [1–4].

В качестве информационной базы реализации модели используются:

а) данные объективного анализа (OAN25), размещенные на ftp-сервере Гидрометцентра России в коде GRIB. Файлы с закодированными данными обрабатываются пакетом программ, после чего формируется электронный архив ежедневных значений давления воздуха на уровне моря в узлах регулярной сетки $5^\circ \times 5^\circ$. Рабочим пространством является территория I естественного синоптического района, ограниченная меридианами 30° з.д. и 70° в.д. и параллелями 40° и 70° с.ш.;

б) архив суточного количества осадков по метеостанции Саратов Юго-Восток.

Технология составления детализированного прогноза осадков включает в себя несколько этапов:

- 1) формирование рабочих выборок;
- 2) определение эталонных полей давления воздуха;
- 3) подбор аналогов выявленным эталонным полям;
- 4) составление прогноза.

1. Формирование рабочих выборок

Рабочие выборки формируются из электронного архива приземных барических полей по данным о суточном количестве осадков. Для каждого месяца формируется своя выборка размерности k . Общий вид выборки следующий:

$$X = \{X(z)\} = (X(1), X(2), \dots, X(k)), \quad 1 < z < k,$$

где k – число выбранных полей; $X(k)$ – конкретное поле из архива, представленное в виде матрицы

$$X(k) = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{m1} & X_{m2} & \dots & X_{mn} \end{pmatrix},$$

где x_{mn} – значение давления в узле регулярной сетки; m – число параллелей; n – число меридианов.

Барические поля выбираются за те дни (срок 00 часов по Гринвичу), в которые суточное количество осадков составило определенное заранее заданное количество. Для месяцев теплого периода выбирались дни, в которых суточное количество осадков составляло 5 мм и более. Отметим, что осадки с обозначенной суточной суммой в агрометеорологии считаются эффективными и полностью усваиваются растениями.

Таким образом, на данном этапе сформированы выборки полей давления отдельно для всех месяцев вегетационного периода, в каждой из которых впоследствии определяется «эталонное» поле.

2. Определение эталонных полей давления воздуха

Настоящая методика составления детализированного долгосрочного прогноза предполагает выделение «эталонного» поля. Под эталонным понимается гидрометеорологическое поле, обладающее наибольшей схожестью с остальными в данном множестве [12]. В качестве меры сходства между барическими полями выбрано евклидово расстояние. За эталон принимается то поле, расстояние от которого до всех остальных полей наименьшее. Таким образом, эталоном является одно из полей выборки, которое ближе по расстоянию ко всем остальным полям и, следовательно, наилучшим образом описывает все поля, входящие в нее.

Расчеты по определению эталонного поля, основанные на статистической оценке минимальных расстояний между барическими полями, ведутся по следующим формулам:

$$C(i, p) = \frac{1}{q} \sqrt{\sum_{j=1}^q (x(i, j) - x(p, j))^2},$$
$$i, p = 1, k,$$
$$q = 147,$$
(1)

где $C(i, p)$ – параметр близости (удаленности) между i и p -м гидрометеорологическими полями; $x(i, j)$, $x(p, j)$ – значения давления в j -й точке i и p -го полей; k – число выбранных полей; q – число узлов регулярной сетки.

По формуле

$$S(i) = \frac{1}{k} \sum_{p=1}^k C(j, p) \quad (2)$$

определяется подобие i -го поля со всеми остальными. Наименьшие значения $C(i, p)$ и $S(i)$ указывают, что i -е поле наиболее близко ко всем p -полям, и поэтому его можно считать эталоном для всех полей. В результате расчетов получены симметричные матрицы параметров близости (удаленности) для каждой совокупности. Члены первой строки матрицы указывают на близость (удаленность) первого поля к остальным, члены второй строки – на близость (удаленность) второго поля к остальным. Значения на главной диагонали матрицы равны нулю, так как указывают на совпадение полей. За эталон принимается поле с наименьшими значениями $C(i, p)$ и $S(i)$. В качестве примера приведем матрицу для определения эталонного поля выпадения осадков в июле (табл. 1).

Таблица 1

Значения параметра близости (удаленности) приземных полей давления при выпадении осадков в июле

Дата	Значения параметра $C(i, p)$						$\Sigma C(i, p)$	$S(i)$
22.07.1999	0,00	0,49	0,75	0,69	0,52	0,45	2,90	0,48
23.07.1999	0,49	0,00	0,83	0,75	0,61	0,75	3,43	0,56
5.07.2000	0,75	0,83	0,00	0,53	0,62	0,55	3,28	0,55
7.07.2000	0,69	0,75	0,53	0,00	0,42	0,48	2,87	0,48
8.07.2000	0,52	0,61	0,62	0,42	0,00	0,51	2,68	0,45
17.07.2002	0,45	0,75	0,55	0,48	0,51	0,00	2,74	0,46

Согласно данным табл. 1, эталонным полем давления выпадения осадков в июле стало приземное поле давления 8 июля 2000 г. На эталонном поле давления выпадения осадков в июле (рис. 1) отчетливо видно, что 8 июля 2000 г. (дата эталонного поля) над территорией Среднего и Нижнего Поволжья располагался циклон,

фронтальные разделы которого и обусловили выпадение осадков. Заметим, что данное эталонное поле получено на материалах 1999–2003 гг. По этим же данным определены эталонные поля давления выпадения осадков для всех месяцев вегетационного периода [11]. Из синоптического анализа найденных эталонных полей было установлено, что синоптическая ситуация, представленная на этих полях, в районе Средней и Нижней Волги очень похожа. Во всех случаях в этом регионе присутствует область низкого давления, под влиянием фронтальных разделов которой происходит образование и выпадение осадков [11].

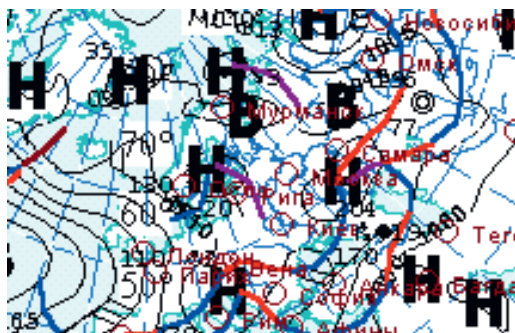


Рис. 1. Эталонное поле давления выпадения осадков в июле (8 июля 2000 г.).

Таким образом, на этом этапе определены эталонные поля давления воздуха, т. е. наиболее типичные, характерные поля, определяющие выпадение осадков обозначенных суточных сумм в каждом отдельном месяце [5–7].

Однако эталоны полезны только при анализе и диагностике атмосферных процессов. Для того чтобы применять эталоны в прогностической практике, необходимо найти для них информативные предикторы.

3. Подбор аналогов эталонным полям давления воздуха

Поиск информативных предикторов осуществляется на основе метода аналогов, привлекающего внимание своей кажущейся простотой, физической очевидностью и позволяющего автоматически

учесть многие линейные и нелинейные взаимодействия системы океан – атмосфера – суша. В настоящем исследовании вместо традиционного принципа аналогичности [13] применен метод «плавающего» аналога, предложенный В.Ф. Мартазиновой. Метод основан на том, что закономерности трансформации фигур планетарной высотной фронтальной зоны не случайны и связаны с квазипериодичностью общей циркуляции атмосферы. Согласно методу «плавающего» аналога, снимается условие совпадения процессов над одной и той же территорией, допускается географическое несовпадение аналогового и текущего синоптического процессов, однако требуется их наилучшее геометрическое подобие. Такое расширенное представление принципа аналогичности получило название метода «плавающего» аналога. Новый подход к определению аналогичности барических полей позволил В.Ф. Мартазиновой выявить квазидвухмесячную периодичность атмосферных процессов на Северном полушарии, что впоследствии послужило основой для выбора временного интервала поиска аналогичных ситуаций и существенно расширило возможности разработки новых физико-статистических схем долгосрочного прогнозирования погоды [1–4].

Таким образом, на данном этапе выявленным эталонным полям давления подбираются аналоги на основе двухмесячной квазипериодичности атмосферных процессов по способу «плавающий» аналог.

Используя двухмесячную квазипериодичность и применяя новый принцип аналогичности, поля-аналоги отыскиваются среди ежедневных полей давления, отстоящих на два месяца назад от эталонных. При этом допускается географическое несовпадение полей при наилучшем их сходстве в распределении знака барического поля. Аналоги подбираются при смещении полей от нуля до $\pm 15^\circ$ по меридиану и от нуля до $\pm 60^\circ$ вдоль круга широты. При таком смещении наиболее полно охватывается территория I естественного синоптического района, а также основные центры действия атмосферы – Исландский минимум, Азорский максимум, зимний Азиатский антициклон. Расчеты проводятся по программе ANALOG.

Степень аналогичности оценивается с помощью показателя ρ :

$$\rho = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-}, \quad (3)$$

где N_+ и N_- – число узлов сетки, в которых аномалии сравниваемых полей совпадают или не совпадают по знаку.

Кроме того, программа выбирает наилучшее сходство в распределении знака барического поля возможных полей-аналогов и эталонных полей и при этом отмечает географическое положение наилучшего аналога. Исследуются все широтно-долготные комбинации смещения возможных аналогов относительно эталонных полей.

Таким образом, для каждого эталонного поля давления подбирается аналог, отстоящий примерно на два месяца назад от эталона и имеющий в каждом конкретном случае свое пространственно-временное смещение. Как пример, в табл. 2 приведены даты полей-аналогов и эталонных полей и указаны координаты смещения аналога относительно эталона. Все расчеты проводились на материалах 1999–2003 гг. [11]. Из анализа широтно-долготного смещения аналогов можно заключить, что аналоги, как правило, имеют восточное смещение, лишь аналог апрельского эталона лежит западнее. В смещении полей аналога относительно эталонных по меридиану какая-либо преобладающая тенденция не обозначилась (табл. 2).

Для определения наилучшего аналога и его пространственно-временного смещения рассчитывались матрицы наилучшей аналогичности. В качестве исходных полей брались три поля, одно из которых – эталонное поле давления, а два других – барические поля, отстоящие на один день назад и один день вперед от эталонного. В качестве возможных аналогов исследуются пять полей, отстоящих на два месяца назад от исходных. На основе матриц наилучшей аналогичности составляются таблицы, в которых исходным полям ставится в соответствие три наилучших поля-аналогов, имеющих наибольший коэффициент связи ρ с исходными полями и совпадающих по направлению смещения по широте и долготе от одного дня к другому.

Таблица 2

Даты аналоговых и эталонных полей

Месяц	Дата эталонного поля	Дата и смещение аналогового поля
Апрель	11.04.2000	11 февраля 2000 г., 15° с.ш. 40° з.д.
Май	13.05.1999	13 марта 1999 г., 5° ю.ш. 60° в.д.
Июнь	29.06.2001	26 апреля 2001 г., 15° с.ш. 50° в.д.
Июль	5.07.2000	3 мая 2000 г., 15° ю.ш. 30° в.д.
Август	10.08.1999	10 июня 1999 г., 15° с.ш. 30° в.д.
Сентябрь	26.09.2002	27 июля 2002 г., 5° ю.ш. 60° в.д.
Октябрь	12.10.2003	11 августа 2003 г., 5° ю.ш. 60° в.д.

В качестве примера (табл. 3) приведем матрицу наилучшей аналогичности для подбора аналога эталонному полю давления выпадения осадков в апреле. Первая строка табл. 3 указывает лучшую степень связи между барическими полями 10 апреля и 9–13 февраля, вторая строка – степень связи между полями 11 апреля и 9–13 февраля и так далее.

Таблица 3

Максимальные значения критерии аналогичности ρ и смещение аналога (в цифрах кода)

Дата исходных полей	Даты возможных аналоговых полей				
	9 февраля	10 февраля	11 февраля	12 февраля	13 февраля
	$\rho \Delta\varphi \Delta\lambda$	$\rho \Delta\varphi \Delta\lambda$	$\rho \Delta\varphi \Delta\lambda$	$\rho \Delta\varphi \Delta\lambda$	$\rho \Delta\varphi \Delta\lambda$
10 апреля	0,272 6 9	0,567 7 10	0,654 7 3	0,760 6 4	0,467 1 10
11 апреля	0,253 4 12	0,467 7 10	0,692 7 11	0,769 5 11	0,792 4 12
12 апреля	0,773 2 7	0,653 6 10	0,613 4 5	0,446 6 9	0,467 1 10

При определении координат сдвига аналога относительно исходных полей приняты следующие обозначения – табл. 4. Из

данных табл. 3 и 4 следует, что наилучшим аналогом барическому полю 11 апреля 2000 г. является барическое поле 11 февраля 2000 г. с коэффициентом связи 0,692, смещенное относительно эталонного на 15° к северу и 40° к западу.

Таблица 4

Цифра кода, обозначающая смещение аналога

Цифры кода	Смещение по меридиану	Смещение вдоль круга широты
1	15° ю.ш.	60° в.д.
2	10° ю.ш.	50° в.д.
3	5° ю.ш.	40° в.д.
4	0°	30° в.д.
5	5° с.ш.	20° в.д.
6	10° с.ш.	10° в.д.
7	15° с.ш.	0°
8	–	10° з.д.
9	–	20° з.д.
10	–	30° з.д.
11	–	40° з.д.
12	–	50° з.д.
13	–	60° з.д.

Аналоги, определенные на основе двухмесячной квазипериодичности атмосферных процессов по способу «плавающий аналог» являются предикторами периодов выпадения осадков в течение месяца и используются в расчетной схеме долгосрочного прогноза периодов выпадения осадков в течение месяца [8–10].

4. Составление прогноза

Кратко принцип составления прогноза можно представить следующей схемой (рис. 2). Согласно схеме, если эталону примерно за два месяца назад от него найден аналог, то ситуация, подобная аналоговой, через два месяца вперед определит синоптическую ситуацию, подобную эталонной.

Таким образом, для составления прогноза на конкретный месяц используются аналоги, отвечающие за прогностическое осуществление выпадения осадков в нем, и ежедневные (текущие) поля давления месяца, отстоящего на один месяц назад от прогнозируемого. С помощью показателя $C(i, p)$ сравниваются аналоговые и текущие поля и определяются даты, в которые значения параметра $C(i, p)$ наименьшие, что указывает на наилучшее сходство полей-аналогов и текущих полей в эти дни. Согласно полученным датам и по принципу двухмесячной квазипериодичности атмосферных процессов, определяются даты выпадения осадков в прогнозируемом месяце (даты с точностью ± 1 день дают указание на периоды выпадения осадков). Таким образом, имеем детализированный прогноз выпадения осадков с одно-двухмесячной заблаговременностью.

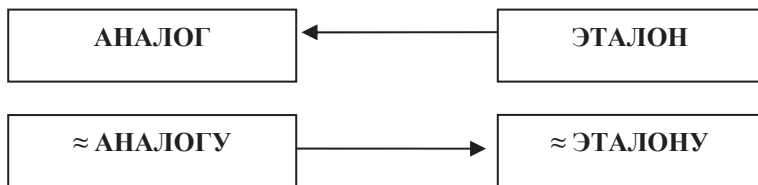


Рис. 2. Схема составления прогноза.

В качестве примера рассмотрим составление прогноза выпадения осадков на апрель 2006 г. Для этого проведем сравнение поля-аналога и текущих полей месяца, отстоящих на один месяц назад от прогнозируемого. При этом используем аналог выпадения апрельских осадков, лежащий в феврале (11 февраля 2000 г.), и сравниваем его по параметру $C(i, p)$ с текущими полями февраля 2006 г. Те из них, которые имеют наибольшее сходство с полем аналога, указывают на прогностические даты периодов выпадения осадков в апреле. В табл. 5 приведены значения параметра $C(i, p)$ поля-аналога и текущих полей февраля 2006 г., по которым составлен прогноз дождливых периодов на апрель 2006 года.

Согласно данным табл. 5, в апреле 2006 г. (прогноз составлен по февралю 2006 г.) осадки ожидалось 5–6, 12–14 и 20–22 апреля.

По фактическим данным, осадки в Саратове выпали в начале месяца 1–2 апреля. Далее с 6 по 16 апреля наблюдался довольно продолжительный дождливый период, прерывающийся однодневным перерывом 11 апреля и двумя двухдневными перерывами 7–8 и 13–14 апреля. Осадки выпали и в конце месяца 23–26 апреля (рис. 3). При проверке случай считался оправдавшимся, если в день максимального подобия текущего и эталонного поля выпадали осадки суточным количеством больше 0,3 мм и даты дней максимального подобия и фактического выпадения осадков отстояли одна от другой не более чем на два дня. В связи с этим можно считать, что осадки, ожидаемые 5–6 апреля, выпали 6 апреля, а осадки, рассчитанные на 12–14 апреля, проявились как продолжительный дождливый период с 9 по 16 апреля. Осадки, спрогнозированные на 20–22 апреля, наблюдались 23–26 апреля. Таким образом, можно заключить, что ожидаемые периоды выпадения осадков с допустимыми сдвигами совпали с фактическими, за исключением осадков 1–2 апреля, которые не были спрогнозированы.

Таблица 5

Значения параметра близости (удаленности) поля аналога (11 февраля 2000 г.) и текущих полей (1–28 февраля 2006 г.) для прогноза на апрель 2006 г.

Дата	$C(i, p)$	Дата	$C(i, p)$	Дата	$C(i, p)$
1	1,41	11	1,26	21	1,02
2	1,33	12	1,03	22	0,97
3	1,19	13	1,18	23	1,27
4	1,21	14	1,13	24	1,56
5	1,14	15	1,51	25	1,99
6	1,08	16	1,86	26	1,90
7	1,27	17	1,85	27	1,74
8	1,50	18	1,66	28	1,69
9	1,70	19	1,25	29	–
10	1,56	20	1,09	30	–

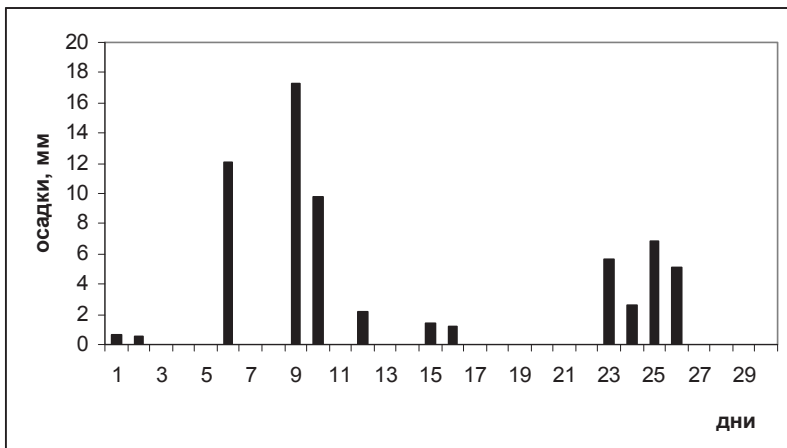


Рис. 3. Гистограмма суточного количества осадков (мм) в апреле 2006 г. по данным метеостанции Саратов Юго-Восток.

Приведем алгоритм составления прогноза при работе в оперативном режиме, который состоит из трех основных блоков (рис. 4):

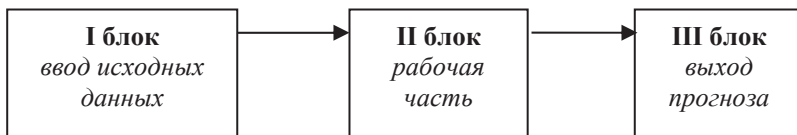


Рис. 4. Алгоритм рабочей схемы составления прогноза.

I блок – блок ввода исходных данных. Из архивированных данных вводятся 30 приземных барических полей прошедшего месяца (например, 1–30 июня 2009 г.) и аналоги эталонных полей давления выпадения осадков во втором месяце вперед от прошедшего (т. е. по прошедшему июню прогнозируется будущий август). В данном случае вводятся аналоги эталонных полей давления выпадения осадков в августе (аналог этих эталонных полей лежит в июне);

II блок – рабочий. В этом блоке проводится расчет параметра $C(i, p)$ и отбор полей по минимальным значениям этого параметра;

III блок – составление прогноза. Указание дней выпадения осадков в прогнозируемом месяце из условия двухмесячной квазипериодичности. Например, если наименьшие значения параметра $C(i, p)$ приходятся на 1–3 июня, то (1–3 июня + 60 дней = 1–3 августа), следовательно, 1–3 августа ожидается выпадение осадков. Поскольку в первых числах июня имеем прогноз по 31 августа, то заблаговременность оказывается один-два месяца.

Отметим, что по описанной технологии для месяцев теплого полугодия в оперативном режиме составляются прогнозы периодов выпадения осадков, которые передаются в лабораторию агрометеорологии НИИСХ Юго-Востока (г. Саратов) и являются консультативными при составлении прогнозов ожидаемых погодных условий в месяцы теплого периода.

Анализ результатов оправдываемости прогнозов проводится с помощью критерия Q по формуле

$$Q = \frac{N_+}{N} \cdot 100 \%,$$

где N_+ – число оправдавшихся прогнозов; N – общее число прогнозов.

Оправдавшимся считался прогноз, когда ожидаемый период выпадения осадков осуществился с допустимыми погрешностями. К неоправдавшимся прогнозам отнесены случаи, при которых ожидаемых осадков не было или фактически выпавшие осадки не были спрогнозированы. Оправдываемость прогнозов дождливых периодов, проведенных на материалах 1999–2014 гг. по м/с Саратов Юго-Восток составила 64,5 %.

Список использованных источников

1. *Мартазинова В.Ф., Сологуб Т.А.* Определение квазипериодичности атмосферных процессов на Северном полушарии с помощью метода «плавающий аналог» // Труды УкрНИГМИ. – 1986. – Вып. 219. – С. 37–42.

2. *Мартазинова В.Ф., Младиная Л.В.* Способ детализированного прогноза погоды на месяц по методу «плавающий аналог» // Труды УкрНИГМИ. – 1986. – Вып. 219. – С. 46–50.

3. *Мартазинова В.Ф.* Временная изменчивость ультрадлинных волн общей циркуляции атмосферы // Труды УкрНИГМИ. – 1987. – Вып. 225. – С. 78–84.

4. *Мартазинова В.Ф., Иванова Е.К.* Метод прогноза температуры и влажности воздуха на Украине для естественно-синоптических периодов на территории Украины // Труды УкрНИИГМИ. – 1989. – Вып. 233. – С. 83–87.

5. *Морозова С.В.* Исследование волн тепла и холода для долгосрочного прогноза резких изменений погоды в течение месяца: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. – Саратов, 2001. – 24 с.

6. *Морозова С.В., Полянская Е.А., Пужлякова Г.А., Фетисова Н.А.* Физико-статистический метод прогноза резких колебаний температуры воздуха в течение месяца. – Саратов: Изд-во СГУ, 2002. – 24 с.

7. *Морозова С.В., Полянская Е.А., Пужлякова Г.А., Фетисова Л.М.* Региональная модель долгосрочного прогноза резких изменений температуры воздуха с месячной заблаговременностью // Изв. Сарат. ун-та. – 2004. – Том 4, вып. 1-2. – С. 195–198.

8. *Морозова С.В., Полянская Е.А., Пужлякова Г.А., Фетисова Л.М.* Региональная модель долгосрочного прогноза осадков // Гидрометеорологическое обеспечение отраслей природопользования: материалы научно-практической конференции. – Туапсе, 2005. – С. 45–46.

9. *Морозова С.В., Полянская Е.А., Пужлякова Г.А., Фетисова Л.М.* К вопросу долгосрочного прогнозирования хода элементов погоды в течение месяца // Известия Сарат. ун-та. Новая серия. Серия Науки о Земле – 2007. – Том 7, вып. 2. – С. 17–19.

10. *Морозова С.В.* Физико-статистический метод прогноза экстремумов метеорологических величин // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2010. – №14. – С. 50–59.

11. *Морозова С.В.* Исследование синоптических процессов методом эталонов. – Саратов: Из-во СГУ, 2013. – 164 с.

12. *Николаев Ю.В.* Классификация гидрометеорологических процессов с помощью ЭВМ. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 36 с.

13. *Руководство* по месячным прогнозам погоды. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 366 с.

Поступила в редакцию 8.10.2015 г.