

Е. В. Шевнина

**ДОСТОВЕРНОСТЬ МЕТОДИКИ ДОЛГОСРОЧНОЙ ОЦЕНКИ
СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАКСИМАЛЬНОГО
СТОКА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ**

E. V. Shevnina

**ASSESSMENT OF THE LONG-TERM FORECASTING
METHODOLOGY FOR PROBABILISTIC CHARACTERISTICS
OF THE SPRING FLOOD FLOWS FOR RUSSIAN ARCTIC**

Проведен сбор и анализ гидрометеорологической информации в пределах водно-ресурсной границы Российской Арктики. Выполнена параметризация модели формирования стока весеннего половодья и получены оценки достоверности результатов ретроспективных прогнозов кривых плотности вероятности при различных вариантах задания параметров. Получены региональные зависимости параметров модели от климатических факторов.

Ключевые слова: методика долгосрочной оценки, слой стока весеннего половодья, параметризация, изменение климата, Российская Арктика.

The historical hydro-meteorological data within the water resource boundary of the Russian Arctic has been collected and analyzed. The parameterization of stochastic model has been conducted. The forecast norm, variation and skewness coefficients for maximum spring flood have been estimated. The retrospective probability forecast has been obtained using Kolmogorov criteria.

Key words: stochastic model of maximal spring flow, parameterization of model, climate change, Russian Arctic.

Введение

В настоящее время существует методика долгосрочной оценки статистических характеристик основных видов водного стока с учетом климатических изменений. Эта методика основана на использовании уравнения Фокера–Планка–Колмогорова в виде системы уравнений для статистических моментов вероятностных распределений многолетнего стока (годового, максимального и минимального) [3, 4, 5, 6].

В систему уравнений для моментов входят параметры, численные значения которых определяются зависимостями от существующих и/или прогнозируемых климатических характеристик (температуры воздуха и/или осадков). Последние получают из климатических сценариев, см., например, [13].

Достоверность результатов, получаемых с применением такой методики, оценивается на ретроспективном материале с использованием многолетних рядов стока, в которых наблюдаются периоды различной водности [3]. Эти периоды выделяются на основе статистически значимых отклонений первого статистического момента (нормы), идентифицируемых по критерию Стьюдента.

В настоящее время получены оценки достоверности результатов долгосрочного прогнозирования статистических характеристик годового и минимального стока для территории Европейской части России [1, 3]. Целью настоящей работы является оценка качества методики для долгосрочных прогнозов статистических характеристик слоя стока весеннего половодья применительно к арктическому региону.

В работе проведен сбор и анализ гидрометеорологической информации в пределах водно-ресурсной границы Российской Арктики, выбраны ряды стока весеннего половодья, где наблюдались периоды различной водности, проведена параметризация модели и даны условные прогнозы начальных моментов распределений максимального стока для различных вариантов задания параметров. Условные прогнозные кривые распределения получены по трем начальным моментам в рамках кривых распределения Пирсона III типа. Для оценки их отклонений от фактических распределений плотности вероятности использовался критерий Колмогорова.

Исходные данные и методика исследования

Для решения задачи выделения периодов различной водности использовались данные наблюдений за стоком весеннего половодья на 57 гидрологических постах, расположенных на территории, ограниченной водно-ресурсной экологической границей Российской Арктики [2]. Данные опубликованы в изданиях Государственного Водного Кадастра (ГВК) «Основные гидрологические характеристики» и «Многолетние данные о ресурсах поверхностных вод» за период с начала наблюдений по 1980 г. Кроме того, на основе ежедневных расходов воды за период апрель-сентябрь на 37 гидрологических пунктах, опубликованных в изданиях ГВК («Гидрологический ежегодник») получены ряды слоя стока за период 1981–2008 гг. Расчет слоя стока весеннего половодья (т.е. удлинение рядов) проводился с соблюдением требований Методических рекомендаций [7].

Ряды многолетних характеристик были проверены на однородность согласно рекомендациям [8, 10] с использованием критериев Стьюдента, Фишера и Колмогорова-Смирнова. Из дальнейшего рассмотрения были исключены ряды, где в последние десятилетия наблюдаются статистически значимые изменения начальных моментов вероятностных распределений [12]. Выделение периодов различной водности проводилось на основе методики, изложенной в работе [8], с использованием критерия Стьюдента в качестве метрики различий норм стока в многолетнем ряду. Значимыми приняты различия норм (при смене маловодного/многоводного периода на многоводный/маловодный) на 10 %-ном уровне значимости.

Для оценки нормы годовых осадков, которые входят в качестве внешнего воздействия в модель формирования стока весеннего половодья, собраны данные наблюдений на 33 метеостанциях, расположенных в бассейнах исследуемых рек [11, 15, 16]. Для каждого водосбора рассчитаны нормы годовых осад-

ков для выделенных периодов водности. Расположение гидрометеорологических постов, данные которых использовались в исследовании представлено, на рис. 1.



Рис. 1. Расположение гидрометеорологических станций и постов в пределах водно-ресурсной границы Арктики (подрайоны: NKI –Кольский п-ов и Карелия, NW – Северный Край, ObEn – Обь-Енисейский район, Esb – Восточная Сибирь)

Математическим ядром (моделью) упрощенной методики долгосрочной оценки изменений статистических характеристик стока является система уравнений для двух начальных моментов вероятностных распределений [5]:

$$\begin{aligned} -\bar{c}m_1 + \bar{N} &= 0; \\ -2\bar{c}m_2 + 2\bar{N}m_1 + G_{\bar{N}} &= 0, \end{aligned} \tag{1}$$

где $\bar{c} = 1/k\tau$ – математическое ожидание величины обратно пропорциональной коэффициенту стока ($\tau = 1$, поскольку процесс относится к марковскому типу); $\bar{N} = \bar{X}$ – математическое ожидание интенсивности внешнего воздействия (осадков); $G_{\bar{N}}$ – случайная составляющая интенсивности внешних воздействий (осадков); m_1 и m_2 – выборочные оценки первого и второго моментов распределений рядов стока весеннего половодья. Третий момент оценивается по соотношению Cs/Cv (коэффициентов асимметрии и вариации).

Условные прогнозы первых двух моментов распределений выполнены с использованием системы (1) на ретроспективном материале с различным периодом водности для нескольких вариантов задания параметра \bar{c} (табл. 1). Принято, что соотношение Cs/Cv остается неизменным. Определение моментов теоретических распределений, аппроксимирующих эмпирические данные, осуществлялось методом L-моментов в рамках кривых Пирсона III типа [14].

Варианты задания параметров в системе уравнения для моментов

№	Параметры	Описание задания параметров на условно-прогнозный интервал времени
I ^{a b}	$\bar{c} = \bar{N} / m_1, G_{\bar{N}} = \text{const}$	$a - \bar{c}$ не меняется; $b - \bar{c}$ задается по фактическим данным
II	$\bar{c} = \bar{N} / m_1$ $G_{\bar{N}} = 43,754 \bar{N}^{0,9036}$	\bar{c} не меняется, $G_{\bar{N}}$ меняется по эмпирической зависимости
III ^{a b}	$\bar{c} = 1 / \{1 - \text{th}[(300 + 25 \bar{T} + 0,05 \bar{T}^3) / \bar{N}]\}$ $G_{\bar{N}} = \text{const}$	\bar{c} определяется формулами Багрова и Тюрка (\bar{T} – норма температуры воздуха) (a – используется переходной коэффициент, связывающий фактическое и расчетное значение \bar{c} ; b – переходной коэффициент не используется)
IV	$\bar{c} = f(\bar{N}, \bar{T}), G_{\bar{N}} = \text{const}$	\bar{c} определяется региональными эмпирическими формулами

Региональные эмпирические зависимости представлены в виде уравнений множественной линейной регрессии, параметры которых оценивались по фактическим данным о выборочных нормах осадков (\bar{N}) и температуры воздуха (\bar{T}).

Алгоритм оценки достоверности методики долгосрочного прогнозирования статистических характеристик слоя стока весеннего половодья следующий: для маловодного периода водности по известным трем начальным моментам распределений рассчитывались численные значения параметров модели, а по многоводному периоду – выпускались условные прогнозные начальные моменты, по которым строились кривые обеспеченности (в рамках распределения Пирсона). Они сравнивались с фактическими, их соответствие оценивалось по критерию согласия Колмогорова [3]. Для прогнозирования с многоводного периода на маловодный проводилась такая же процедура. Всего было выпущено 46 условных прогнозов статистических характеристик стока весеннего половодья для каждого варианта задания параметров модели (системы уравнений для моментов).

Результаты и их обсуждение

Многолетние ряды слоя стока весеннего половодья на 76 гидрологических постах использовались для решения задачи выделения различных периодов водности. При этом удлиненных рядов (с начала наблюдений до 2002 г.) было 19, а коротких (с начала наблюдений по 1980 г.) – 57. Периоды различной водности наблюдались в 47 % удлиненных рядов и в 25 % – для рядов с данными до 1980 г. Общее число рядов, где наблюдались периоды различной водности, составило 23, т.е. 30 % от общего числа.

По данным репрезентативных метеостанций для каждого водосбора получены нормы годовых осадков, соответствующие периодам различной водности. Выборочные оценки нормы слоя стока весеннего половодья, продолжительность маловодных и многоводных периодов и нормы осадков репрезентативных метеостанций представлены в табл. 2.

**Статистические характеристики выделенных периодов водности
и изменчивость нормы осадков на водосборах Российской Арктики**

Код поста	Река – пост	Маловодный период			Многоводный период		
		Годы	Норма слоя стока, мм	Норма осадков, мм	Годы	Норма слоя стока, мм	Норма осадков, мм
03403	Куонапка – Джалинда	1943-84	98	255	1985-2002	116	262
03414	Яна – Верхоянск	1935-65	41	177	1966-2002	52	178
03518	Нера – Ала Чубук	1944-85	67	227	1986-2002	85	222
01176	Бохапча – 5,4 км от устья	1934-49	111	421	1950-80	141	435
01309	Сеймчан – 2,1 км выше устья р. Чапаев	1957-77	157	305	1941-56	190	273
01623	Средникан – Средникан	1935-50	148	426	1951-80	180	431
09425	Турухан – Янов стан	1941-70	232	491	1971-99	256	494
11574	Пяку-Пур – Тарко-Сале	1954-1970	133	482	1971-2001	162	514
11805	Надым – Надым	1975-91	142	471	1955-74	162	490
70410	Печора – Якша	1930-93	276	564	1914-29	302	516
70414	Печора – Троицко-Печорское	1938-56	250	490	1957-80	278	601
70047	Солза – Сухие Пороги	1959-80	155	552	1928-58	190	525
70153	Юг – Подосиновец	1931-45	126	575	1946-80	144	591
70180	Вычегда – М. Кужба	1930-56	147	491	1957-80	167	550
70360	Лодья – Коровкинская	1959-77	174	546	1939-58	219	533
70366	Кулой – Кулой	1959-80	110	446	1927-58	134	467
70466	Уса – Петрунь	1936-56	374	483	1957-80	432	558
70509	Ижма – Усть-Ухта	1948-80	162	534	1933-47	189	465
70531	Пижма – Боровая	1937-63	129	486	1964-80	150	552
70522	Ухта – Ухта	1950-80	144	535	1934-49	170	473
71104	Кола – 1429 км Октябрьской ж.д.	1928-53	182	350	1954-94	203	459
71199	Умба – Паялка	1959-94	149	475	1931-58	180	414
71241	Ена – 15,5 км от устья	1934-48	100	451	1949-80	129	557

Для каждого из периода водности были рассчитаны выборочные значения трех начальных моментов распределений слоя стока весеннего половодья [9]. Относительные погрешности расчета нормы стока и коэффициентов вариации составили в среднем 6 и 16 %, соответственно. Относительные погрешности коэффициента вариации значительны вследствие малых объемов выборок.

Для получения региональных зависимостей для задания параметров модели (системы уравнений для моментов) в варианте IV использовались как статистические характеристики слоя стока весеннего половодья, осадков и температуры воздуха по периодам водности, так и многолетние ряды. Все зависимости являются линейными уравнениями вида:

$$Y = \sum a_i X_i + b,$$

где Y – параметр $1/\bar{c}$ в системе (1); X_i – климатические характеристики (осадки и температура воздуха); a_i и b – коэффициенты зависимости. В табл. 3 представлены региональные зависимости и описаны условия их получения.

Таблица 3

Региональные зависимости расчета параметра $1/\bar{c}$ в системе (1)

№	Регион*	R**	X_i	a_i	b	Примечания об исходных данных
1	ObEn, ESb	0,85	\bar{N} \bar{T}	-0,0010 0,0622	1,461	По маловодным периодам
2	ObEn, ESb	0,4	\bar{N} \bar{T}	-0,0005 0,0510	1,210	По многоводным периодам
3	NKI, NW	0,63	\bar{N} \bar{T}	-0,0005 -0,0614	0,570	По маловодным периодам
4	NKI, NW	0,59	\bar{N} \bar{T}	-0,0002 -0,0540	0,470	По многоводным периодам
5	NW	0,73	\bar{N} \bar{T}	-0,0005 -0,0792	0,064	По маловодным периодам
6	NW	0,62	\bar{N} \bar{T}	-0,0001 -0,0550	0,350	По многоводным периодам
7	NKI, NW	0,58	\bar{T}	0,0299	0,736	По маловодным периодам
8	ObEn, ESb	0,61	\bar{T}	-0,0636	0,337	По маловодным периодам
9	NKI, NW	0,67	\bar{T}	0,0404	0,928	По многоводным периодам
10	ObEn, ESb	0,62	\bar{T}	-0,0551	0,385	По многоводным периодам
11	NKI, ObEn	0,85	\bar{N} \bar{T}	-0,0024 -0,0149	1,456	По всему ряду
12	NW	0,76	\bar{N} \bar{T}	0,0009 -0,0850	-0,129	По всему ряду
13	ESb	0,93	\bar{N} \bar{T}	-0,0012 0,1010	2,074	По всему ряду
14	NKI	0,58	N T	-0,0009 0,0126	0,778	По годовым значениям
15	NW	0,52	N T	-0,0004 -0,0441	0,556	По годовым значениям
16	ObEn	0,37	N T	-0,0006 -0,0161	0,572	По годовым значениям
17	ESb	0,39	N T	-0,0004 0,0456	1,115	По годовым значениям

Примечания: * обозначения соответствуют рис. 1; ** – коэффициент множественной корреляции.

Региональные зависимости использовались для задания параметра σ в системе (1) на условно-прогнозный интервал времени. При этом условный прогноз с маловодного на многоводный период давался на основе зависимости, полученной по данным маловодного периода и наоборот (варианты 1–10). Единые регрессионные уравнения применялись вне зависимости от водности в вариантах 11–17.

На основе системы уравнений (1) выполнены условные прогнозы нормы и коэффициентов вариации, а значение коэффициента асимметрии получено по фактическому соотношению C_s/C_v . Эти три начальных момента использовались для построения кривых накопленных вероятностей в рамках распределения Пирсона III типа, которые сравнивались с эмпирическими кривыми, полученными по фактическим данным наблюдений (рис. 2). Результаты оценки условных прогнозов по критерию Колмогорова на различных уровнях значимости при различных вариантах задания параметров стохастической модели представлены в табл. 4. Общее число условных прогнозов на ретроспективном материале составило 46 для каждого варианта задания параметров модели.

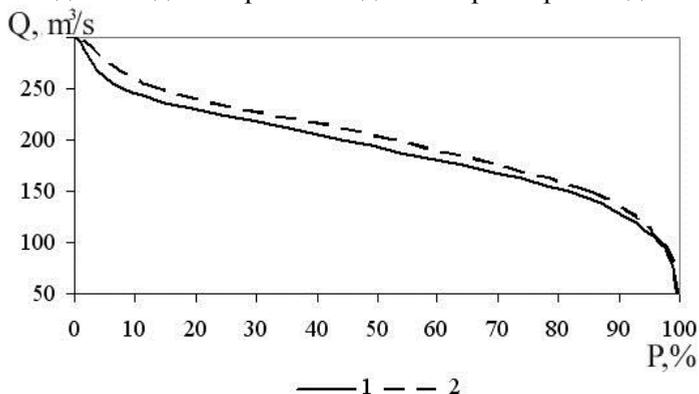


Рис. 2. Пример фактических (1) и условно прогнозных (2) кривых обеспеченности слоя стока весеннего половодья (р. Солза – Сухие Пороги, период 1928–58 гг.)

Как видно из таблицы, наилучшие условные прогнозы получены для варианта, когда параметр оценивался по фактическим данным прогнозного периода (гипотетическая ситуация). В реальности, располагая информацией об изменении норм осадков и температуры воздуха (полученной по ретроспективным данным или из климатического сценария), оправдываемость условных прогнозов составляет около 70 % на всех уровнях значимости для большинства регионов. Достоверность методики долгосрочной оценки статистических характеристик стока весеннего половодья выше на всех уровнях значимости при условном прогнозе с маловодного периода на многоводный.

Оценивая полученные на 10 %-ном уровне значимости результаты, можно отметить, что для арктической территории в целом наилучшие результаты получены для варианта, когда прогностическое значение параметра σ задается по

региональным зависимостям, параметры которых оценивались по данным о годовых коэффициентах стока (46 % оправдавшихся условных прогнозов). Этот же вариант дает наилучшие результаты для территории Карелии и Кольского п-ва. В Восточной Сибири наибольший процент оправдываемости получен для варианта IV / (1–2, 5–6) без переходного коэффициента, связывающего фактическое и расчетное значение параметра $1/\sigma$. В северной части Средней Сибири (низовья рек Обь и Енисей) наилучшие результаты дает модель с постоянными параметрами (вариант I^a). Для Северного края наиболее удачными являются варианты I и VI^k / (1–4).

Таблица 4

Процент оправдавшихся условных прогнозов статистических характеристик стока весеннего половодья с использованием критерия Колмогорова на 5 и 10 %-ном уровнях значимости (α) [%]

Вариант задания параметров*(эмпирическая зависимость**)	Арктическая территория									
	В целом		Восточная Сибирь		Низовья р. Обь и Енисей		Северный Край		Карелия и Кольский п-в	
	$\alpha=10$	$\alpha=5$	$\alpha=10$	$\alpha=5$	$\alpha=10$	$\alpha=5$	$\alpha=10$	$\alpha=5$	$\alpha=10$	$\alpha=5$
I ^a	43	57	42	75	67	83	41	45	33	33
I ^b	96	98	92	100	100	100	95	95	100	100
II	35	52	42	67	50	83	27	41	33	33
III ^a	35	43	58	67	33	33	27	36	17	33
IV ^k / (1-4)**	33	50	42	75	0	17	41	50	17	33
IV ^k / (1-2, 5-6)	39	50	42	67	67	83	32	36	33	33
IV / (1-2, 5-6)	33	35	67	67	33	33	18	23	17	17
IV / (11-13)	35	43	42	58	17	33	36	41	33	33
IV / (7-10)	43	54	58	67	50	83	32	41	50	50
IV / (14-17)	46	54	50	67	33	50	36	41	83	83

Примечания: * – нумерация соответствует табл. 1; ** – нумерация соответствует табл. 3; в расчетах по варианту IV^k параметры, полученные по эмпирической зависимости, связывались с фактическими значениями переходным коэффициентом.

Выводы

Собраны многолетние ряды слоя стока весеннего половодья, годовых сумм осадков и среднегодовых температуры воздуха на метеорологических станциях в пределах водосборов средних рек на территории Российской Арктики. Анализ рядов стока весеннего половодья позволил выявить репрезентативные водосборы, в режиме стока которых наблюдались периоды различной водности, выявляемые на основе статистически значимого различия выборочных первых моментов при разбивке многолетнего ряда на две части. Общее число таких водосборов составило 23, т. е. 30 % от общего числа.

Для каждого периода водности рассчитаны эмпирические значения нормы, коэффициентов вариации и асимметрии, а также определены численные значения параметров (в различных вариантах) модели формирования стока весеннего половодья. В качестве внешнего воздействия использовались нормы годовых

сумм осадков на водосборе, а также температуры приземного воздуха, рассчитанные по данным репрезентативных метеорологических станций.

Рассмотрены варианты задания параметров прогностической модели в виде системы уравнений для моментов. Эти варианты можно условно разбить на две группы: при постоянных параметрах модели и при переменных. Для второй группы были предложены региональные эмпирические зависимости параметров модели от климатических характеристик (осадков и температуры воздуха). Численные значения параметров уравнений множественной регрессии получены на ретроспективном материале. Для большинства региональных зависимостей множественный коэффициент корреляции составляет более 0,65.

Для различных вариантов задания параметров модели получены оценки достоверности методики прогноза статистических характеристик слоя стока весеннего половодья на территории Российской Арктики. Эта достоверность оценивалась на основании сравнения условно прогнозных и фактических кривых обеспеченностей, построение которых осуществлялось в рамках модели распределений семейства Пирсона III типа по известным первым трем начальным моментам. В качестве метрики использовался критерий Колмогорова. Общее число условных прогнозов составило 46.

Предложить единую (универсальную) схему параметризации стохастической модели формирования стока весеннего половодья, одинаково пригодную для всех регионов Российской Арктики не удалось (но, возможно это и не нужно). Для территории Арктики в целом оправдываемость условных прогнозов кривых обеспеченностей составляет менее 50 %.

Однако при более детальном региональном рассмотрении и выделении 4-х подрайонов в пределах Российской Арктики можно использовать варианты параметризации модели формирования стока весеннего половодья, основанные на использовании эмпирических зависимостей в виде уравнений множественной регрессии. При этом оправдываемость методики долгосрочной оценки вероятностных характеристик на ретроспективном материале составляет 67–83 % (на 5 и 10 %-ном уровне значимости по критерию Колмогорова).

Исследования выполнялись в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. (номер гранта П740, научный руководитель: заведующий кафедрой гидрофизики и гидропрогнозов Российского Государственного гидрометеорологического университета профессор В.В. Коваленко).

Литература

1. *Викторова Н.В.* Исследование применимости стохастической модели формирования летне-осеннего и зимнего минимального стока для оценки последствий антропогенного изменения климата: Дис. ... канд. техн. наук. – СПб.: РГГМУ, 2002. – 240 с.
2. *Иванов В.В., Янкина В.А.* Водные ресурсы Арктики, их изученность и очередные задачи исследований // Проблемы Арктики и Антарктики, 1991, вып. 66, с. 118-128.
3. *Коваленко В.В., Викторова Н.В., Гайдукова Е.В.* Моделирование гидрологических процессов. – СПб.: РГГМУ. 2006. – 559 с.

4. Коваленко В.В. Гидрологическое обеспечение надежности строительных проектов при изменении климата. – СПб.: РГГМУ, 2009. – 100 с.
5. Коваленко В.В., Викторова Н.В., Гайдукова Е.В., Громова М.Н., Хаустов В.А., Шевнина Е.В. Методические рекомендации по оценке обеспеченных расходов проектируемых гидротехнических сооружений при неустановившемся климате / Под ред. В. В. Коваленко. – СПб.: РГГМУ, 2010. – 51 с.
6. Коваленко В.В., Гайдукова Е.В., Викторова Н.В. Влияние изменения климата на многолетний слой стока весеннего половодья рек Арктической зоны России / Уч. зап. РГГМУ, 2010, № 14, с. 14–19.
7. Методические рекомендации по составлению справочника по водным ресурсам СССР, вып. 7, ч. 1. Половодье. – Л., 1962. – 107 с.
8. Пространственно временные колебания стока рек СССР / Под ред. А.В. Рождественского. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 375 с.
9. Рождественский А.В., Чеботарев А.И. Статистические методы в гидрологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 424 с.
10. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой, 2004. – 74 с.
11. Специализированные массивы для климатических исследований // ВНИИГМИ МЦД. 2011. URL: www.meteo.ru (дата обращения 21.06.2011).
12. Шевнина Е.В. Анализ стационарности многолетних рядов слоя стока весеннего половодья на водосборах Российской Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики, 2011, 1(87), с. 56-64.
13. IPCC Assessment reports // 2009. URL: [www://www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch) (дата обращения 20.06.2011).
14. Hosking J.R.M. L-moments—Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. // Journal of the Royal Statistical Society, Series B. 1990, vol. 52, p. 105–124.
15. Klein T. Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment // Int. J. of Climatology. 22. 2002, p. 1441-1453.
16. Razuvayev V.N., Apasova E.G., Martuganov R.A., Steurer P., Vose R. Daily Temperature and Precipitation Data for 223 U.S.S.R. Stations. Numerical data package – 040. Tennessee: Oak Ridge National laboratory. 1993.