

Б.А. Бирман, А.Н. Багров, Ю.А. Краюшкин, Е.В. Балашова

ТЕХНОЛОГИЯ ЭКСПРЕСС-МОНИТОРИНГА КЛИМАТИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕЕ ИСПЫТАНИЙ

В ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана технология экспресс-мониторинга климатических аномалий температуры воздуха на территории Северного полушария Земли.

Основной целью технологии экспресс-мониторинга является *оперативное обеспечение* потребителей информацией о произошедших климатических изменениях температуры воздуха экстремального характера. Такая информация должна быть получена и при необходимости представлена в органы государственной власти в течение 2–5 дней после завершения соответствующего временного периода: месяц, сезон, год.

Еще одной целью является оперативное представление результатов мониторинга на сайте Гидрометцентра России, а также в других электронных и печатных средствах информации.

Технология экспресс-мониторинга перманентно развивается на основе меняющихся методов обработки и анализа информации.

Для экспресс-мониторинга климатических аномалий температуры воздуха используются *историческая и оперативная базы данных*.

В качестве главной исторической базы использованы среднемесячные значения температуры воздуха в узлах регулярной сетки $5^{\circ} \times 10^{\circ}$ за 1891–1995 гг. На момент начала работ по созданию технологии экспресс-мониторинга такая информация содержалась в базе «ROWS» банка данных «Прогноз» Гидрометцентра России. Она была создана под руководством Г.В. Груза в конце 80-х – начале 90-х годов прошлого столетия и представляла собой результаты оцифровки карт среднемесячной температуры воздуха по Северному полушарию, созданных

ранее в Гидрометцентре СССР и его предшественниках. В 2014–2015 гг. все названные выше поля температуры воздуха, а их оказалось 1260 (105 лет \times 12 мес.), были проконтролированы и при необходимости исправлены. Контроль осуществлялся в два этапа. На первом этапе все поля были заново переинтерполированы в узлы сетки $5^\circ \times 5^\circ$ из узлов сетки $5^\circ \times 10^\circ$ методом оптимальной статистической интерполяции с последовательными коррекциями, одновременно были восполнены пропущенные данные в узлах. На втором – все 1260 полей были картированы и визуально проконтролированы специалистом.

Другой источник исторической базы данных – это нормы температуры воздуха по станциям за 1961–1990 гг., опубликованные в издании ВМО [1]. Климатические нормы по территории Российской Федерации и стран СНГ были предоставлены ВНИИГМИ-МЦД. Некоторая информация была получена в результате обмена данными с рядом стран-членов ВМО. Таким образом был скомплектован массив норм температуры воздуха за 1961–1990 гг. по 1728 станциям Северного полушария.

Оперативная база данных – это макеты «MIDL» базы данных «SHOT», в которых содержатся среднемесячные значения температуры воздуха в коде «CLIMAT» и среднемесячные значения, полученные в результате осреднения данных, поступивших в коде «SYNOP». За сутки в Гидрометцентр России поступает около 8000 телеграмм в коде «SYNOP», которые содержат наблюдения над температурой воздуха на уровне станции ($h = 2$ м).

Далее в рамках технологии экспресс-мониторинга для суши и океана используется разная методика.

Для суши по методу, разработанному А.Н. Багровым, осуществляется расчет среднесуточных значений температуры воздуха по всем станциям земного шара, данные с которых поступают в Гидрометцентр России. Перед осреднением данные наблюдений подвергаются контролю. Естественно, что наилучшие результаты осреднения получаются для тех станций, где имеются правильные наблюдения за все восемь сроков. Надо сказать, что наблюдения температуры имеют сравнительно небольшой процент ошибок ($\sim 0,1\%$), и в большинстве случаев их несложно выявить. Для контроля применяется метод «скользящего осреднения».

Для этого используются восемь значений температуры за проверяемые сутки, два значения за 18 и 21 ч предыдущих и еще два значения за 00 и 03 ч последующих суток. Значение температуры за какой-либо срок сравнивается с полусуммой значений за соседние сроки, и если разница превосходит некоторый допустимый порог, то оно бракуется. По принятым значениям вычисляется среднесуточная температура. Если пропущены два срока наблюдений подряд, то контроль не осуществляется и среднесуточная температура не вычисляется. Для станций с восьмисрочными наблюдениями такой контроль работает довольно надежно и хорошо отбраковывает случайные грубые и средние ошибки. Для станций с четырехразовыми наблюдениями порог увеличен, и контроль работает менее надежно.

При осреднении за месяц привлекаются все принятые среднесуточные значения, входящие в этот интервал. Окончательно полученный результат используется в дальнейших расчетах, если число среднесуточных значений температуры в месяце не менее $(K-2)$, где K – число дней в месяце.

Проведенные сравнения полученных таким способом значений среднемесячной температуры с аналогичными значениями, вычисленными непосредственно на станциях и поступивших в Гидрометцентр России в сводках «CLIMAT», показали, что примерно для 96–98 % станций разница не превышает $\pm 0,1$ °С. Сравнения осуществлялись на протяжении десяти лет и эпизодически продолжают по настоящее время по 750 станциям. Таким образом, предложенный способ осреднения данных о температуре воздуха на станциях позволяет получить довольно надежную информацию о среднемесячной температуре сразу по окончании периода осреднения. Вместе с тем, если к моменту начала расчетов по экспресс-мониторингу, т. е. 2-го числа, поступили данные в сводке «CLIMAT», то приоритет отдается им. Далее, используя осредненные за месяц данные и нормы, вычисляются аномалии среднемесячной температуры воздуха, которые методом оптимальной интерполяции интерполируются в сетку $5^\circ \times 5^\circ$ по Северному полушарию.

При интерполяции в узел сетки привлекаются данные восьми ближайших и, по возможности, симметрично расположенных станций. Симметричность расположения устанавливается с помощью специальной программы. В качестве поля первого приближения для

отклонений температуры от норм берется нулевое поле. Рассчитывается корреляционная функция для приземной температуры воздуха (она близка к нулю для расстояний, больших ~ 1500 км). Для каждого узла сетки строится корреляционная матрица и решается система линейных уравнений до восьмого порядка, откуда и находятся интерполяционные веса каждой станции. Метод неплохо работает в хорошо освещенных данными районах, но, например, в Африке, где станций мало, возможны искажения, так как в этом случае чаще всего вместо интерполяции имеет место экстраполяция. Таким образом, сразу по завершении месяца рассчитываются аномалии среднемесячной температуры в узлах сетки $5^\circ \times 5^\circ$ по суше.

Для океанов используются результаты объективных анализов температуры воздуха на уровне моря за все сроки наблюдений, затем они осредняются за месяц. (Метод объективного анализа рекомендован к использованию решением ЦМКП от 21.10.2011 г.) Результаты объективных анализов размещены в базе «FAMN». Далее для океанов в узлах сетки $5^\circ \times 5^\circ$ рассчитываются аномалии температуры воздуха на уровне моря. В качестве норм используются 12 карт норм температуры воздуха (1961–1990 гг.) по Северному полушарию, созданные Е.В. Балашовой. Основой для построения карт являлись бланки МПК-6, масштаб 1:30 000 000.

Объединение аномалий, рассчитанных отдельно для суши и моря, осуществляется с помощью специальной «маски» суша-море, и это позволяет в кратчайший срок, как правило, 2-го числа, иметь необходимую информацию об аномалиях среднемесячной температуры воздуха по всему Северному полушарию за завершившийся месяц. Каждое новое поле объединенных аномалий подвергается визуальному контролю специалиста.

На основе предложенного метода осуществляется пополнение исторической информационной базы начиная с 1996 года.

Таким образом, после завершения соответствующего временного периода (месяц, сезон, год) у исследователя в каждом узле $5^\circ \times 5^\circ$ имеется информация об аномалиях среднемесячной температуры воздуха с января 1891 года по прошедший месяц.

Осреднение по регионам и ранжирование результатов

Для экспресс-мониторинга климатических аномалий температуры воздуха выбрано 20 регионов (табл. 1).

Список регионов и число узлов в каждом из них

Название региона	Кол-во узлов (5°×5°)	Примечание
Северное полушарие	1225	
Россия	140	
Северо-Западный федеральный округ	17	
Центральный федеральный округ	4	
Южный федеральный округ	4	
Приволжский федеральный округ	8	
Уральский федеральный округ	17	
Сибирский федеральный округ	42	
Дальневосточный федеральный округ (сев. часть)	47	
Дальневосточный федеральный округ (южная часть)	11	
Северо-Кавказский федеральный округ	2	
Канада	81	
США (без Аляски)	43	
США (штат Аляска)	17	
Китай	40	
Индия	17	
Европа (без ЕТР)	39	
Северная Африка	71	
Арктика	288	
Москва	—	Син. индекс 27612

Поскольку границы большинства регионов не совпадают с параллелями и меридианами сетки 5°×5°, то узлы, определяющие эти регионы, входят в регион с разными весами. В центре региона они имеют, как правило, вес, равный 1, а вдоль границ – меньше 1.

Средняя температура воздуха и аномалия температуры воздуха за каждый месяц периода (1891 г. – настоящее время) рассчитывается как среднее значение величин в узлах сетки 5°×5°, включенных в данный регион, а именно:

$$X_{m,r} = \frac{\left[\sum_i V_i \cdot X_i \cdot \cos \varphi_i \right]}{\sum_i V_i \cdot \cos \varphi_i},$$

где $X_{m,r}$ – средняя температура воздуха по региону r за m -ый месяц; X_i – значения среднемесячной температура воздуха в узлах сетки $5^\circ \times 5^\circ$ региона; V_i – вес значения узла в регионе, заданный отдельной таблицей для каждого региона.

Таким образом, создается и пополняется база региональных статистик (средние значения и аномалии температуры воздуха) по каждому региону за все месяцы, начиная с января 1891 г. и заканчивая завершившимся текущим месяцем. По завершению очередного месяца база пополняется. Происходит это 2-го числа следующего месяца. В этот же срок рассчитывается ранг температуры воздуха за прошедший месяц в сравнении с другими значениями начиная с 1891 г. Он также сохраняется в базе. Ранг – это порядковый номер температуры в ряду данных с 1891 г. Первый ранг, т. е. высший, имеет самая большая температура (максимум в ряду), низший – самая маленькая (минимум в ряду). Таким образом, 2-го числа месяца, следующего за истекшим периодом (месяц, сезон, год), имеется возможность ответить на вопрос: каким был этот период – экстремально теплым, экстремально холодным, близким к экстремуму или к норме.

В табл. 2 показан пример рассчитанных региональных статистик за август 2014 года.

Таблица 2

Региональные статистики. Средние температуры воздуха (0,1°) и аномалии (0,1°). Август 2014 г.

Регион	Год	Период	Т возд.	Аномалия	Ранг
Северо-Западный федеральный округ	2014	Август	149	20	14
		Лето	138	7	40
		Накопл.	41	23	5
Центральный федеральный округ	2014	Август	207	21	14
		Лето	199	10	23
		Накопл.	103	25	7
Южный федеральный округ	2014	Август	273	38	4
		Лето	253	20	5
		Накопл.	144	16	4

Таблица 2 (продолжение)

Регион	Год	Период	Т возд.	Аномалия	Ранг
Приволжский федеральный округ	2014	Август	232	32	6
		Лето	218	10	34
		Накопл.	89	15	17
Уральский федеральный округ	2014	Август	154	14	23
		Лето	147	–4	79
		Накопл.	10	8	33
Сибирский федеральный округ	2014	Август	141	12	17
		Лето	150	13	8
		Накопл.	–25	19	5
Дальневосточный федеральный округ (северная часть)	2014	Август	125	31	1
		Лето	109	19	5
		Накопл.	–22	27	1
Дальневосточный федеральный округ (южная часть)	2014	Август	186	22	3
		Лето	173	20	5
		Накопл.	33	19	4
Россия	2014	Август	158	19	2
		Лето	154	12	9
		Накопл.	11	20	5
Канада	2014	Август	139	14	5
		Лето	135	14	5
		Накопл.	–15	10	18
США (без Аляски)	2014	Август	269	3	37
		Лето	266	5	24
		Накопл.	181	7	24
США (штат Аляска)	2014	Август	126	17	8
		Лето	115	9	22
		Накопл.	21	24	5
Китай	2014	Август	289	1	75
		Лето	292	5	24
		Накопл.	200	9	11
Индия	2014	Август	302	8	4
		Лето	312	10	1
		Накопл.	280	5	14

Таблица 2 (окончание)

Регион	Год	Период	Т возд.	Аномалия	Ранг
Европа (без ЕТР)	2014	Август	201	7	44
		Лето	199	11	13
		Накопл.	139	20	1
Северная Африка	2014	Август	322	26	23
		Лето	312	22	32
		Накопл.	250	24	2
Арктика	2014	Август	54	21	4
		Лето	48	18	8
		Накопл.	-86	29	3
Северо-Кавказский федеральный округ	2014	Август	279	54	3
		Лето	260	37	2
		Накопл.	146	19	5
Северное полушарие	2014	Август	236	12	1
		Лето	231	12	1
		Накопл.	173	12	1
Москва	2014	Август	192	28	7
		Лето	188	17	16
		Накопл.	90	26	3

Примечание. Накопл. – средняя температура, аномалия и ранг за период с января по завершившийся месяц. В данном случае с января 2014 г. по август 2014 г.

Ранг температуры воздуха помещается в специальную таблицу, из которой хорошо видно, в каких регионах были достигнуты экстремальные значения температуры воздуха. Пример такой таблицы за 2015 г. представлен в табл. 3. Аналогичная таблица составляется и по регионам Северного полушария (табл. 4).

Кроме таблицы информация о температуре воздуха, в случае экстремальных значений или близких к ним, может сопровождаться, например, диаграммами (рис. 1) или картами (рис. 2).

Диаграмма, дополняя содержание табл. 3 и 4, позволяет проследить, например, за тенденциями межгодовых изменений температуры, хотя это не является основной целью экспресс-мониторинга, а карта, в случае экстремальных событий, дает представление об их пространственной локализации.

Таблица 3

**Ранг средней температуры воздуха по месяцам и за год
за 125 лет наблюдений (1891–2015 гг.) по территории России**

Регион	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Россия	13	4	6	11	7	2	21	13	6	45	40	4	2
Северо-Западный федеральный округ	47	4	2	12	2	18	112	48	3	66	24	7	1
Центральный федеральный округ	7	11	7	37	41	27	68	29	4	99	16	2	1
Южный федеральный округ	38	48	28	72	25	4	31	18	3	114	33	10	5
Северо-Кавказский федеральный округ	87	93	64	58	34	3	8	15	3	<i>118</i>	80	38	13
Приволжский федеральный округ	34	13	27	48	19	3	78	81	3	99	15	1	5
Уральский федеральный округ	55	8	6	11	1	4	95	112	47	94	61	13	6
Сибирский федеральный округ	17	9	9	12	19	6	6	11	31	30	37	10	1–3
Дальневосточный федеральный округ (северная часть)	13	25	55	39	34	2	5	18	20	13	89	108	15
Дальневосточный федеральный округ (южная часть)	14	2	2	23	32	30	7	5	14	40	61	7	1
Москва	18	10	4–6	41	29	30	60	32	4	73	23	2	1

Примечание. Во 2–14-ом столбцах представлен ранг средней температуры воздуха за 125 лет наблюдений (1 – максимум средней температуры, 125 – минимум средней температуры). Жирным шрифтом отмечены десять самых теплых периодов года, жирным курсивом – самых холодных.

Таблица 4

**Ранг средней температуры воздуха по месяцам и за год за 124 года наблюдений
(1891–2014 гг.) по Северному полушарию Земли**

Регион	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Россия	80	32	2	3	5	12–15	27	2	36	86	43	21	6–7
Канада	20	50	90	84	16	7	9	5	31	16	82	27	20
США (без Аляски)	61	47	57	17	18	18–21	38	37	11	4	109	3	13

Таблица 4 (окончание)

Регион	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
США (штат Аляска)	1	59	24	22	9	56	36	8	10	91	6	8	2–4
Китай	17	77	6	12	9	18	24	75	9	5	13	68	7
Индия	51	87	44	22	48	2–6	3	4	22	17	20	99	14
Европа (без ЕТР)	4	1–2	1	2–3	43	12	6	44	11	3	3	25	1
Северная Африка	6	28	30	4	5	50	29	23	1	20	16	63	2
Арктика	18	5	2	5	5	13	14	4	9	11	22	22	4
Северное полушарие	3	14	4	2	3–6	1–3	3	1–2	2–6	2–4	5	1–3	2

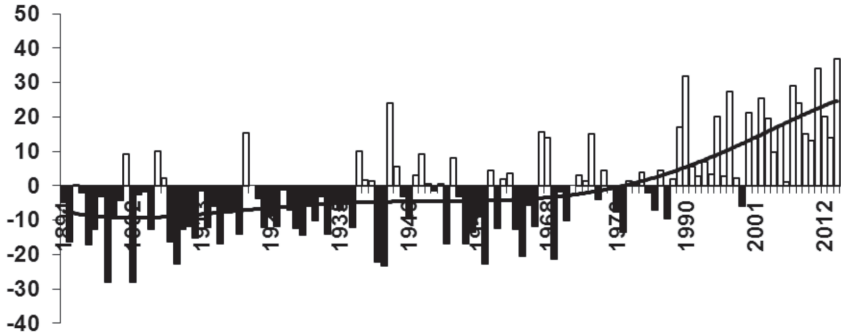


Рис. 1. Аномалии средней температуры воздуха (0,1 °C) в России весной 1891–2014 г.

Краткие предварительные результаты экспресс-мониторинга 2–3-го числа месяца, следующего за истекшим периодом (месяц, сезон, год), размещаются на сайте Гидрометцентра России в разделе «Новости»: <http://www.meteoinfo.ru/news>, а 7–8-го числа этого же месяца более полная версия с анализом погодно-климатических условий за истекший период – в разделе «Климат»: <http://www.meteoinfo.ru/climate>. Примерно через 5–7 дней после этого информация доступна в англоязычной версии.

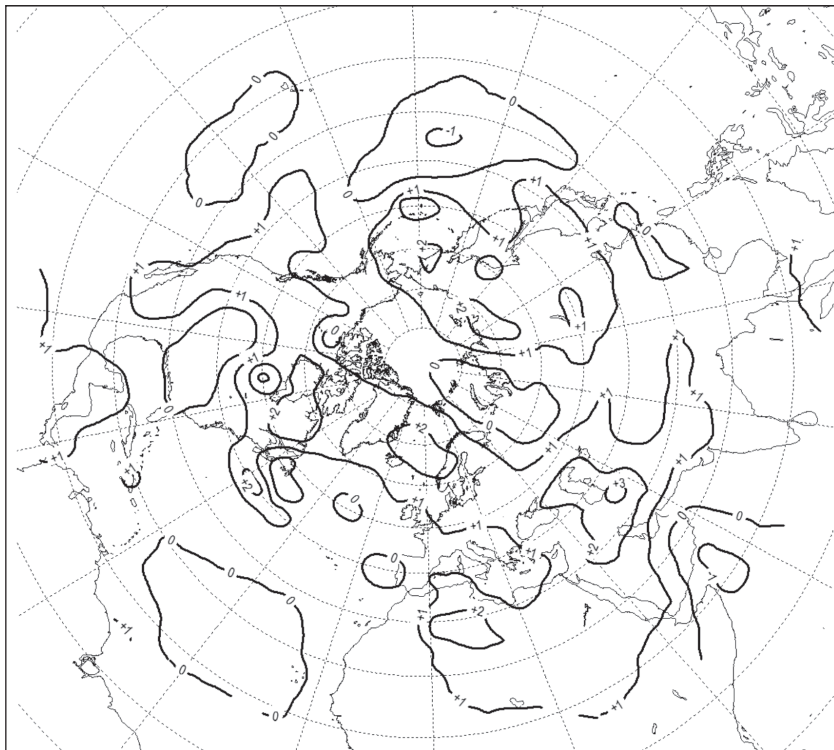


Рис. 2. Аномалии средней температуры воздуха (°С) летом 2014 г. на Северном полушарии Земли.

Сравнение результатов экспресс-мониторинга с другими источниками информации

Объективные трудности представляет сравнение полученных результатов с аналогичными или близкими к ним по смыслу в других источниках информации. Во-первых, потому что их не так много. По Северному полушарию это может быть, например, информация на сайте NOAA (NCDC Climate Monitoring) – доступна не ранее 18–20-го числа месяца, следующего за истекшим периодом, а по территории Российской Федерации – в материалах ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН». Во-вторых, методы анализа (списки используемых станций, методы

осреднения, периоды для расчета норм) далеко не всегда совпадают, поэтому прямое сравнение результатов по рассчитанным средним значениям или вычисленным аномалиям некорректно. Для этой цели может использоваться ранг рассчитанной температуры воздуха, поскольку, если она была экстремальной или близкой к ней, этот факт должен быть выявлен при любом методе анализа.

В табл. 5 представлены результаты ранжирования средней температуры воздуха по Северному полушарию по данным сайтов Гидрометцентра России и NOAA за 2014–2016 годы.

Таблица 5

Ранг средней температуры воздуха по Северному полушарию по месяцам и за год по данным NOAA (расчеты проводятся с точностью до 0,01°) и Гидрометцентра России (расчеты проводятся с точностью до 0,1°) за период с 1891 г. по текущий год

Сайт	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
2014 г.													
NOAA	4	29	5	1	3	1	5	1	2	3	9	1	1
Гидромет-центр России	3–5	9–11	1	4–6	4–8	3	1–6	1–2	1–6	3–6	6–7	1	1
2015 г.													
NOAA	2	3	2	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Гидромет-центр России	2	2	1–2	4–7	1	1	1	1–2	1	1	1	1	1
2016 г.													
NOAA	1	1	1	1	2	1	1	1	1	4–5			
Гидромет-центр России	1	1	1	1	1–2	1	1	1	1–2	2–3			

Что касается территории Российской Федерации, то результаты экспресс-мониторинга можно сравнить с данными представленными на сайте ИГКЭ Росгидромета и РАН (табл. 6 и 7).

Таблица 6

**Ранг средней температуры воздуха за год по территории России
по данным Гидрометцентра России и ИГКЭ Росгидромета и РАН**

Сайт	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.
Гидрометцентр России	4	7	6	7	2
ИГКЭ	5	12	6	8	1

Таблица 7

**Ранг средней температуры воздуха по территории России за 2016 г.
по данным Гидрометцентра России и ИГКЭ Росгидромета и РАН**

Сайт	Зима	Весна	Лето	VI	VII	VIII
Гидрометцентр России	1	3	1	2–3	2–4	1
ИГКЭ	2	3	1	5	5	1

Авторы технологии: А.Н. Багров (расчеты среднемесячных значений и аномалий температуры воздуха по станциям, интерполяция в узлы сетки $5^\circ \times 5^\circ$, объединение данных по суше и океанам), Е.В. Балашова (подготовка норм температуры воздуха по станциям, создание карт норм температуры воздуха по Северному полушарию), Б.А. Бирман (постановка задачи, выбор регионов, контроль и ранжирование результатов расчета аномалий, создание выходной продукции: таблицы, диаграммы, карты, информация для сайта Гидрометцентра России), Ю.А. Краюшкин (разработка оригинальных программных средств для переинтерполяции аномалий температуры воздуха в исторической базе данных, а также для осреднения по регионам и ранжированию результатов). На программу «Оптимальная статистическая интерполяция с последовательными коррекциями» получено свидетельство о регистрации в Роспатенте (№ 2016610906 от 21.01.2016 г.).

Список литературы

1. Climatological normals (CLINO) for the period 1961–1990 // WMO, No 847. – Geneva, 1996.