

*Д.Б. Киктев, М.А. Толстых, Р.Б. Зарипов, Е.Н. Круглова, И.А. Куликова,
В.П. Мелешко, В.М. Мирвис, Т.Ю. Львова, В.А. Матюгин*

**О РЕЗУЛЬТАТАХ СОВМЕСТНЫХ ОПЕРАТИВНЫХ ИСПЫТАНИЙ
ТЕХНОЛОГИИ ДЕТАЛИЗИРОВАННЫХ ПО ВРЕМЕНИ
АНСАМБЛЕВЫХ ДОЛГОСРОЧНЫХ ПРОГНОЗОВ НА ОСНОВЕ
ГЛОБАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ГИДРОМЕТЦЕНТРА РОССИИ
И ГГО ИМ. А.И. ВОЕЙКОВА**

Введение

Опыт зарубежных и отечественных исследований показал, что наиболее эффективным инструментом прогнозирования на внутрисезонных временных интервалах является ансамблевое гидродинамическое моделирование, а объединение результатов лучших, качественно близких прогностических моделей позволяет получить максимально возможную на современном уровне успешность прогнозов. Актуальность подобных работ определила кооперацию передовых прогностических центров в рамках международного проекта S2S (Subseasonal to Seasonal Prediction Project, <http://s2sprediction.net/>), стартовавшего под эгидой Всемирной программы исследования погоды и Всемирной программы исследований климата ВМО.

В России в этом направлении активно сотрудничают Гидрометцентр России (ГМЦ) с глобальной полулагранжевой моделью с адвекцией вихря (ПЛАВ) и Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова (ГГО) со спектральной моделью T63L25 [1]. В 2012 г. были инициированы работы по унификации технологий прогнозирования ГМЦ и ГГО с целью создания гибкой технологии ансамблевых внутрисезонных прогнозов на срок до 45 суток с недельной временной детализацией для первого прогностического месяца.

В апреле 2012 г. были организованы совместные оперативные испытания этих технологий по согласованной программе. Позднее, в связи с внесением изменений в версию модели ПЛАВ в начале 2016 г., испытательная выборка согласованных оперативных прогнозов была ограничена периодом с 30 марта 2016 г. по 15 марта 2017 г. и составила 51 прогноз.

По результатам испытаний, рассмотренным на заседании Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета (ЦМКП) 20 июня 2017 г. было принято решение о целесообразности использования прогнозов ГМЦ, ГГО и их комплекса (мультимодельных прогнозов) в качестве консультативных прогнозов в информационном обеспечении Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ). Ниже дается краткое описание технологии прогнозов, условий проведения и результатов испытаний.

1. Модели и технологии прогнозирования

В Гидрометцентре России по аналогии со схемой сезонного прогноза реализована технология выпуска долгосрочных прогнозов с недельной детализацией. Сходство технологий определяется единой вычислительной основой – моделью ПЛАВ Гидрометцентра России/Института вычислительной математики РАН [9] со среднесуточной дискретностью записи прогностической информации. Для оперативного долгосрочного прогноза рассчитывается ансамбль из 20 прогностических реализаций по версии модели ПЛАВ с горизонтальным разрешением $1,406^\circ$ по долготе, $1,125^\circ$ по широте и 28 уровнями по вертикали. При этом эволюция температуры поверхности океана (ТПО) и концентрации морского льда описывается с помощью наложения аномалий этих полей в момент начала расчета прогноза на средние климатические ежедневные значения с постепенным затуханием аномалии в течение прогностического периода. Технология генерации ансамблей начальных данных основана на методе «выращивания» быстрорастущих возмущений [16].

В ГГО технология детализированных по времени метеорологических прогнозов на срок до 45 суток основана на расчетах по спектральной модели атмосферы T63L25 (МОЦА MGO-3) [2]. Горизонтальное разрешение модели составляет $1,9^\circ \times 1,9^\circ$, по вертикали учитывается 25 уровней в сигма-системе координат, шаг интегрирования по времени составляет 10 минут. Граничные условия формулируются в предположении сохранения начального распределения аномалий ТПО без изменений на всем периоде интегрирования. Начальные аномалии концентрации морского льда удерживаются в течение 21 суток с последующей релаксацией к климатическому распределению. Ансамбль прогнозов включает девять расчетов с использованием слабо возмущенных начальных состояний атмосферы, которые генерируются посредством выращивания возмущений в модели на основе метода [7, 16]. Более подробную информацию о подготовке прогнозов в ГГО можно найти в [3, 4].

В технологиях ГМЦ и ГГО используются единые источники данных о начальном состоянии атмосферы и океана. Комплект начальных атмосферных полей формируется на основе оперативного объективного анализа с разрешением $2,5^\circ \times 2,5^\circ$, выполняемого

в Гидрометцентре России. В качестве исходной информации о ТПО и концентрации морского льда используются результаты их еженедельного анализа по методике [14], доступные на сайте <http://iridl.ldeo.columbia.edu>.

Для исключения систематических ошибок в результатах долгосрочного моделирования прогнозы представляются в виде полей аномалий относительно модельного климата. Модельные климатические поля оцениваются при этом по данным многолетних серий ретроспективных прогнозов. Для детализированных по времени прогнозов моделей ГМЦ и ГГО на 1,5 месяца сохранялись осредненные за сутки числовые поля, представленные в сетке $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ для пяти метеорологических характеристик: геопотенциала поверхности 500 гПа (H-500), давления на уровне моря (SLP), температуры воздуха на уровне 850 гПа (T-850) и у поверхности Земли (TRSF), а также интенсивности атмосферных осадков (PREC). Далее на этапе пост-обработки они используются для формирования в ГМЦ и ГГО независимых выходных комплектов прогностической информации с исключенными систематическими ошибками.

Унифицированный комплект прогноза по каждой технологии включает глобальные сеточные поля ($2,5^\circ \times 2,5^\circ$) средних ансамблевых аномалий и вероятностей трех градаций аномалий (ниже нормы, норма, выше нормы)* по каждой из пяти характеристик (H-500, SLP, T-850, TRSF, PREC) для шести периодов временного осреднения: недели 1, 2, 3, 4 (средние за 1–7, 8–14, 15–21, 22–28 сутки соответственно) и два месячных интервала: месяц 1 (1–30 сутки), месяц 2 (16–45 сутки) (всего 120 глобальных полей). Наличие прогностических данных с суточным временным разрешением позволяет гибко формировать на их основе средние поля для шести выбранных временных «окон» и в случае необходимости изменить временные интервалы для прогноза и для оценки качества прогностической схемы. Оценки параметров модельного климата и систематических ошибок осуществляются независимо в ГМЦ и ГГО для каждой модели по многолетним рядам ретроспективных прогнозов, охватывающих период с 1982 года.

Для территории Северо-Евразийского региона дополнительно предусмотрена пространственная детализация прогнозов приземной температуры воздуха и количества осадков для 70 пунктов, на которых проводятся метеорологические наблюдения (рис. 1).

Прогнозы в пунктах составляются с использованием билинейной интерполяции и корректировки систематических ошибок по данным ретроспективных прогнозов. Результаты прогнозов передаются по локальным и глобальным линиям связи, что позволяет объединить прогностическую деятельность ГМЦ и ГГО в единую технологическую линию для создания мультимодельного прогноза. При этом в каждой точке с равными весами объединяются

* Границы градаций соответствуют терциям климатического распределения аномалий.

средние ансамблевые аномалии (с исключенными систематическими ошибками) и вероятности трех градаций аномалий (ниже нормы, норма, выше нормы), полученные в ГМЦ по ансамблю из 20 прогнозов и в ГГО по ансамблю из 9 прогнозов. Более подробное описание единой технологической линии прогнозов содержится в [1].



Рис. 1. Схема расположения пунктов прогноза. Пунктирами показаны границы разделения на территории на долготные сектора.

Прогностические карты средних ансамблевых аномалий и вероятностей указанных выше метеорологических величин, полученные по прогнозам ГМЦ, ГГО и мультимодельному прогнозу с недельным и месячным разрешением, размещаются на сайте Северо-Евразийского климатического центра (<http://neacc.meteoinfo.ru/>) и регулярно (раз в неделю) обновляются. На рис. 2 приводится пример прогностической продукции для региона Северной Евразии.

2. Организация совместных оперативных испытаний

В рамках совместных оперативных испытаний был установлен график еженедельного выпуска прогнозов по средам с использованием в качестве исходной информации данных объективного анализа состояния атмосферы за 00 ч ВСВ и анализа состояния поверхности океана за предшествующую неделю. Обмен результатами прогнозов по согласованному формату осуществлялся до начала периода прогноза.

Были согласованы источники эталонных фактических данных, используемых для оценки успешности прогнозов, а также методы, критерии и регионы оценивания.

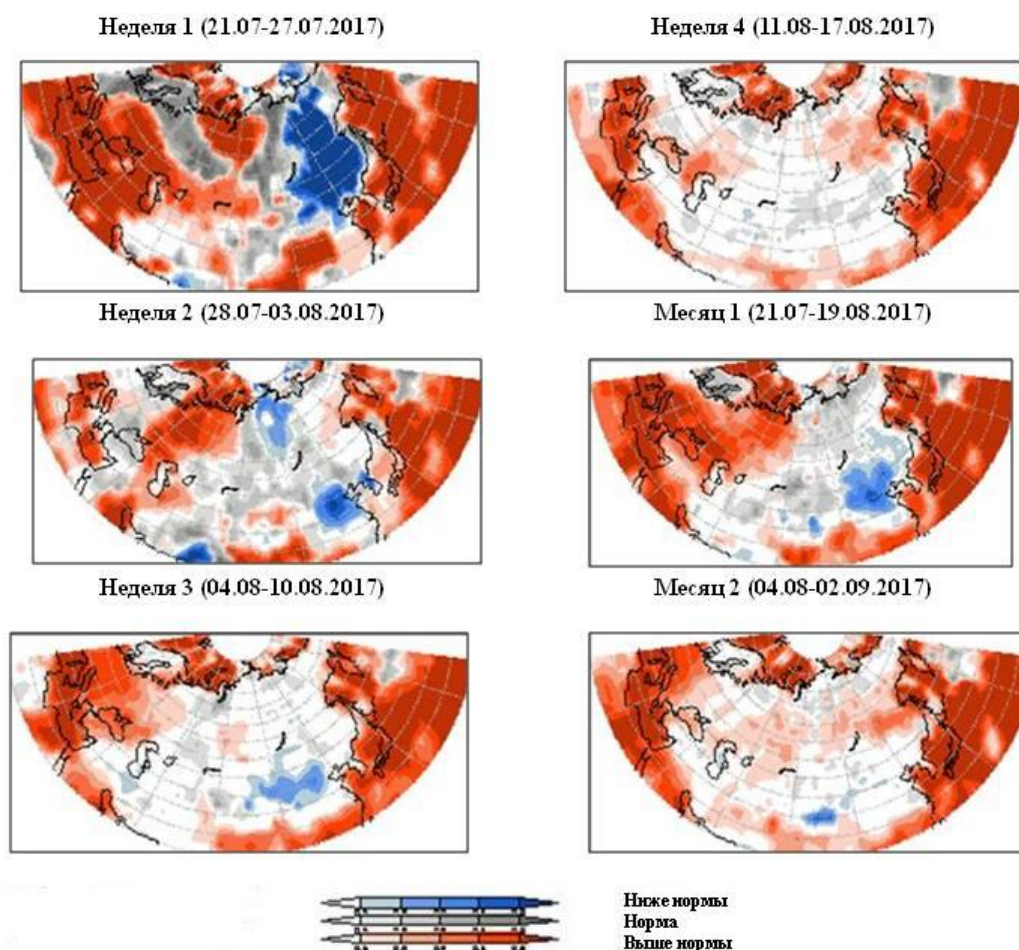


Рис. 2. Пример мультимодельного вероятностного прогноза приземной температуры воздуха для региона Северной Евразии (дата прогноза 20.07.2017 г.).

Для оценки сеточных полей эталонные фактические данные рассчитывались исходя из шестичасовых данных реанализа NOAA NCEP-DOE Reanalysis-2 [13]. Параметры эталонного климата оценивались по 30-летним рядам за 1981–2010 годы.

Для оценки прогнозов приземной температуры воздуха и количества осадков по пунктам фактические значения рассчитывались по результатам наблюдений на станциях. Параметры эталонных климатических распределений прогнозируемых переменных были рассчитаны по данным архива ВНИИГМИ-МЦД, доступного на сайте <http://meteo.ru/data>, за 1961–1990 гг. Использование для этой цели периода 1980–2010 гг. оказалось невозможным в связи с наличием большого количества пропусков в данных наблюдений в последнем десятилетии XX века.

В состав критериев оценки прогнозов по величине аномалий включены рекомендованные руководящими документами [8, 15]: средняя квадратическая ошибка (RMSE), относительная ошибка (Q), пространственный коэффициент корреляции аномалий (ACC), оценка прогноза аномалии по знаку (ρ) и оценка мастерства прогнозов по отношению

к климату (MSSS). Оценка успешности вероятностных прогнозов трех градаций в соответствии с требованиями [15] осуществлялась посредством расчетов площади под кривой ROC, сопоставляющей относительные доли удачных прогнозов и ложных тревог при различных уровнях пороговой вероятности. Формулы для расчетов и более подробную информацию по данным критериям можно найти в [6, 8, 15].

Перечисленные критерии рассчитывались по сеточным данным в пределах трех регионов: внетропические широты Северного полушария (20° с. ш. – 90° с. ш.), тропики (20° ю. ш. – 20° с. ш.), Северо-Евразийский регион (40° с. ш. – 70° с. ш., 20° в. д. – 180° в. д.). Успешность прогнозов в пунктах оценивалась по всем 70 станциям, а также отдельно по трем секторам (Европейская часть, Западная Сибирь, Восточная Сибирь и Дальний Восток). Границы разделения на сектора показаны линиями на рис. 1.

Успешность каждого прогноза ГМЦ, ГГО и их мультимодельного комплекса оценивалась индивидуально, а также интегрально по всему периоду испытаний. Оценки успешности рассчитывались независимо в ГМЦ и ГГО и впоследствии сопоставлялись.

3. Результаты оперативных испытаний

3.1. Оценки качества прогнозов сеточных полей

Оценки качества прогнозов полей аномалий по критериям RMSE, MSSS, ACC и ρ , полученные в среднем за период испытаний, приведены в табл. 1–4.

Данные табл. 1 показывают, что наибольшие различия в ошибках RMSE прогнозов на основе моделей ГГО и ГМЦ отмечались для приземной температуры воздуха на территории Северной Евразии и Северного полушария (внетропические широты). В тропиках различия в оценках были невелики. В отдельных случаях, за исключением приземной температуры воздуха, преимущественно на интервалах первой и четвертой недель, а также первого и второго месяца интегрирования, комплексирование прогнозов позволило улучшить их качество, хотя и незначительно.

Значения критерия ACC (табл. 2) подтверждают выявленные ранее различия между успешностью прогнозов ГГО и ГМЦ. В табл. 2 выделены графы, для которых различия средних ACC прогнозов ГГО и ГМЦ, при оценке их по двухвыборочному t-критерию Стьюдента, являются статистически значимыми (нулевая гипотеза отвергается на 5%-ном доверительном уровне). По этим данным, как и по RMS, наиболее значительные преимущества прогнозов ГГО отмечаются для температуры воздуха.

Отметим, что по всем методическим прогнозам (ГМЦ, ГГО и их комплексу) средние оценки ACC почти для всех метеорологических величин во всех регионах и на всех

интервалах прогноза – положительны (исключением являются оценки прогнозов на четвертую неделю по Северной Евразии).

Таблица 1. Средние значения RMSE прогнозов ГГО, ГМЦ и мультимодельного комплекса (МК) по территориям Северо-Евразийского региона (СЕР), внетропической зоны Северного полушария (СП) и тропиков (ТР)

Период	Метод прогноза	H-500, дкм			SLP, гПа			T-850, °C			TRSF, °C			PREC, (мм/сут)		
		СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР
Неделя 1	ГМЦ	4.16	3.90	0.87	3.53	3.34	0.92	1.92	1.75	0.97	2.41	2.25	0.75	1.94	2.76	5.66
	ГГО	3.79	3.42	0.82	3.21	2.98	0.91	1.73	1.62	0.98	2.08	1.72	0.74	1.67	2.49	5.9
	МК	3.55	3.27	0.71	2.97	2.83	0.78	1.62	1.51	0.91	2.04	1.80	0.70	1.67	2.44	5.49
Неделя 2	ГМЦ	8.41	7.62	1.19	6.79	6.12	1.34	3.38	2.97	1.16	3.52	2.95	0.89	2.13	3.08	5.84
	ГГО	7.24	6.51	1.09	5.98	5.39	1.22	2.85	2.60	1.15	3.05	2.43	0.84	1.89	2.80	5.96
	МК	7.31	6.55	1.03	5.97	5.31	1.16	2.85	2.57	1.08	3.05	2.49	0.82	1.90	2.80	5.68
Неделя 3	ГМЦ	9.29	8.12	1.28	7.11	6.39	1.41	3.62	3.13	1.20	3.73	2.98	0.89	2.03	2.99	5.81
	ГГО	8.35	7.16	1.17	6.51	5.78	1.29	3.31	2.83	1.17	3.43	2.61	0.86	1.95	2.86	5.95
	МК	8.48	7.29	1.15	6.53	5.79	1.26	3.31	2.83	1.12	3.43	2.65	0.83	1.93	2.83	5.72
Неделя 4	ГМЦ	8.83	7.53	1.27	6.41	5.85	1.34	3.51	2.96	1.16	3.68	2.90	0.88	1.97	2.85	5.78
	ГГО	8.72	7.43	1.15	6.45	5.86	1.29	3.39	2.91	1.15	3.48	2.66	0.84	1.93	2.86	5.95
	МК	8.56	7.29	1.13	6.26	5.69	1.24	3.34	2.85	1.12	3.46	2.67	0.83	1.91	2.80	5.72
Месяц 1	ГМЦ	4.88	4.22	0.76	3.52	3.29	0.81	2.00	1.69	0.81	2.34	2.05	0.64	1.08	1.62	3.53
	ГГО	4.42	3.80	0.69	3.33	3.12	0.78	1.79	1.53	0.82	1.99	1.57	0.60	1.03	1.54	3.65
	МК	4.45	3.78	0.68	3.26	3.01	0.72	1.80	1.52	0.78	2.03	1.68	0.59	1.01	1.51	3.43
Месяц 2	НМС	5.35	4.48	0.84	3.65	3.45	0.87	2.23	1.79	0.85	2.54	2.10	0.67	1.08	1.60	3.55
	ГГО	5.26	4.39	0.77	3.71	3.45	0.86	2.10	1.75	0.86	2.28	1.77	0.63	1.07	1.61	3.76
	МК	5.13	4.27	0.73	3.55	3.32	0.79	2.10	1.70	0.82	2.31	1.84	0.62	1.05	1.56	3.51

Таблица 2. Средние значения АСС прогнозов ГГО, ГМЦ и мультимодельного комплекса (МК) по территориям Северо-Евразийского региона (СЕР), внетропической зоны Северного полушария (СП) и тропиков (ТР)

Период	Метод прогноза	H-500, дкм			SLP, гПа			T-850, °C			TRSF, °C			PREC, (мм/сут)		
		СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР
Неделя 1	ГМЦ	0.84	0.84	0.65	0.8	0.79	0.65	0.79	0.78	0.49	0.67	0.57	0.49	0.39	0.37	0.21
	ГГО	0.87	0.87	0.71	0.83	0.83	0.66	0.81	0.8	0.51	0.75	0.74	0.53	0.47	0.46	0.26
	МК	0.88	0.88	0.73	0.85	0.84	0.72	0.83	0.83	0.57	0.76	0.74	0.57	0.48	0.47	0.29
Неделя 2	ГМЦ	0.31	0.31	0.33	0.23	0.26	0.31	0.30	0.31	0.18	0.26	0.2	0.23	0.13	0.12	0.11
	ГГО	0.38	0.40	0.38	0.25	0.3	0.41	0.36	0.38	0.24	0.37	0.42	0.35	0.17	0.18	0.16
	МК	0.38	0.40	0.41	0.28	0.32	0.41	0.39	0.39	0.26	0.37	0.37	0.34	0.17	0.18	0.18
Неделя 3	ГМЦ	0.00	0.03	0.2	-0.03	0.01	0.21	0.04	0.07	0.09	0.07	0.06	0.22	0.01	0.03	0.08
	ГГО	0.11	0.15	0.16	0.02	0.08	0.29	0.08	0.16	0.13	0.17	0.28	0.27	0.02	0.07	0.11
	МК	0.05	0.10	0.23	-0.02	0.05	0.29	0.08	0.14	0.14	0.14	0.22	0.29	0.03	0.06	0.13
Неделя 4	ГМЦ	-0.07	0.00	0.10	-0.01	0.03	0.16	-0.07	0.01	0.07	0.02	0.04	0.21	-0.02	0.04	0.07
	ГГО	-0.05	0.01	0.12	0.00	0.00	0.21	-0.04	0.03	0.12	0.08	0.21	0.27	0.03	0.03	0.11
	МК	-0.07	0.00	0.15	-0.01	0.01	0.22	-0.07	0.03	0.12	0.06	0.17	0.27	0.01	0.04	0.11
Месяц 1	ГМЦ	0.28	0.34	0.37	0.31	0.31	0.42	0.29	0.34	0.24	0.27	0.2	0.37	0.20	0.2	0.18
	ГГО	0.42	0.43	0.39	0.34	0.34	0.49	0.41	0.42	0.28	0.45	0.52	0.45	0.21	0.25	0.25
	МК	0.38	0.43	0.44	0.36	0.36	0.50	0.40	0.43	0.31	0.41	0.45	0.45	0.24	0.26	0.26
Месяц 2	НМС	0.02	0.04	0.21	0.04	0.05	0.33	0.01	0.08	0.15	0.09	0.07	0.3	0.04	0.08	0.13
	ГГО	0.04	0.07	0.22	0.00	0.03	0.36	0.08	0.12	0.17	0.22	0.34	0.36	0.05	0.09	0.17
	МК	0.06	0.07	0.27	0.01	0.05	0.40	0.08	0.13	0.19	0.19	0.27	0.36	0.05	0.10	0.19

На интервале первой недели (за исключением прогнозов осадков) оценки АСС превышают уровень 0,6, считающийся уровнем практической предсказуемости [12].

Обращают на себя внимание относительно невысокие показатели прогнозов на первую неделю в тропиках по сравнению с оценками по территории Северной Евразии и Северного полушария. На более длительных интервалах заблаговременности (четвертая неделя прогноза и второй месяц), когда состояние атмосферы зависит не столько от начальных условий, сколько от состояния океана и поверхности суши, наоборот, качество прогнозов в тропиках выше, чем во внетропических широтах. Данное обстоятельство, возможно, связано с наличием в тропиках крупномасштабных структур (например, ЭНЮК, осцилляция Маддена – Джулиана и др.), которые являются более инерционными, а потому и легче прогнозируемыми объектами.

Прогнозы осадков на всех временных интервалах характеризуются оценками АСС ниже уровня практической предсказуемости. На рис. 3 представлены графики временного хода АСС для первой (а), второй (б), третьей (в) и четвертой (г) недели. На графиках заметно ухудшение качества прогнозов осадков и ГМЦ и ГГО в течение летнего периода.

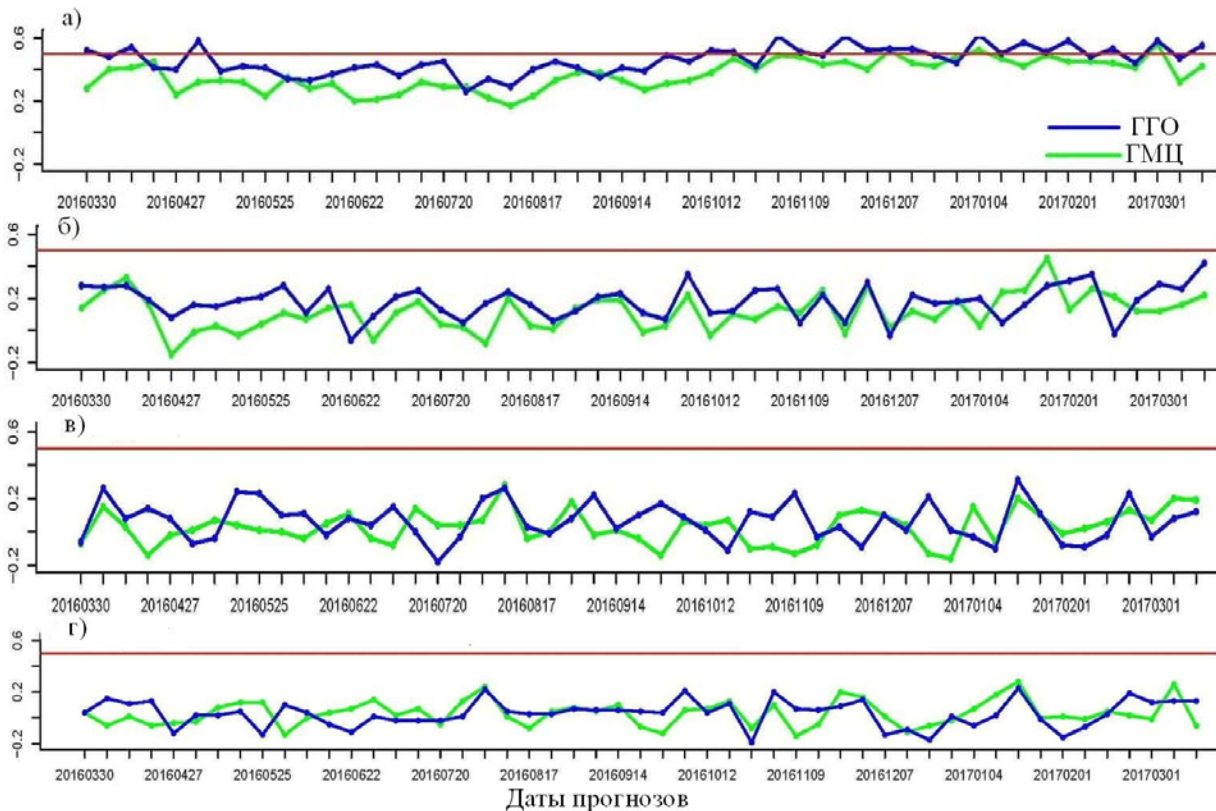


Рис. 3. Временные ряды оценок АСС прогнозов аномалий количества осадков для недели 1 (а), 2 (б), 3(в), 4 (г) для внетропической зоны Северного полушария за период испытаний.

В табл. 3 приведены средние оценки качества прогнозов по критерию MSSS, позволяющие определить преимущества методических прогнозов по сравнению с климатическими. Расчет статистической достоверности полученных оценок производился с помощью непараметрического метода повторных выборок с возвратом, известного как «бутстреп» [11]. Повторные выборки генерировались с помощью датчика случайных чисел в количестве, равном 100. Наряду со средними значениями MSSS для получения статистически значимых оценок (в пределах 10%-ного уровня) были оценены соответствующие доверительные интервалы.

Таблица 3. Средние значения MSSS прогнозов ГГО, ГМЦ и мультимодельного комплекса (МК) по территориям Северо-Евразийского региона (СЕР), внутритропической зоны Северного полушария (СП) и тропиков (ТР)

Период	Метод прогноза	H-500, дкм			SLP, гПа			T-850, °C			TRSF, °C			PREC, (мм/сут)		
		СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР
Неделя 1	ГМЦ	0,74	0,72	0,75	0,66	0,63	0,42	0,67	0,63	0,33	0,52	0,35	0,34	-0,11	-0,02	0,01
	ГГО	0,79	0,78	0,78	0,72	0,7	0,45	0,73	0,69	0,29	0,64	0,64	0,36	0,19	0,17	-0,07
	МК	0,82	0,8	0,83	0,76	0,74	0,6	0,76	0,73	0,4	0,66	0,59	0,43	0,18	0,19	0,07
Неделя 2	ГМЦ	-0,06	-0,1	0,51	-0,25	-0,23	-0,23	-0,05	-0,07	0,04	0	-0,1	0,04	-0,32	-0,27	-0,05
	ГГО	0,22	0,2	0,59	0,02	0,02	0,01	0,25	0,18	0,06	0,23	0,26	0,16	-0,02	-0,04	-0,1
	МК	0,2	0,19	0,63	0,02	0,06	0,1	0,25	0,2	0,15	0,25	0,22	0,2	-0,04	-0,04	0,01
Неделя 3	ГМЦ	-0,28	-0,25	0,41	-0,36	-0,34	-0,33	-0,22	-0,18	-0,02	-0,12	-0,12	0,04	-0,18	-0,18	-0,05
	ГГО	-0,01	0,03	0,51	-0,14	-0,11	-0,12	0	0,03	0,03	0,04	0,14	0,11	-0,08	-0,08	-0,1
	МК	-0,05	-0,01	0,52	-0,15	-0,11	-0,05	-0,01	0,03	0,09	0,05	0,12	0,17	-0,06	-0,06	-0,01
Неделя 4	ГМЦ	-0,14	-0,08	0,39	-0,11	-0,14	-0,24	-0,17	-0,08	0,02	-0,12	-0,09	0,05	-0,12	-0,08	-0,03
	ГГО	-0,12	-0,06	0,5	-0,13	-0,16	-0,13	-0,09	-0,04	0,04	-0,01	0,1	0,13	-0,07	-0,09	-0,1
	МК	-0,07	-0,02	0,51	-0,06	-0,08	-0,05	-0,06	0	0,1	0	0,09	0,16	-0,05	-0,04	-0,01
Месяц 1	ГМЦ	0,09	0,11	0,72	-0,05	-0,09	-0,14	0,15	0,15	0,22	0,09	-0,02	0,24	-0,11	-0,12	-0,01
	ГГО	0,24	0,27	0,77	0,06	0,01	0	0,32	0,31	0,2	0,33	0,43	0,33	0,02	-0,01	-0,08
	МК	0,24	0,28	0,78	0,09	0,08	0,12	0,31	0,32	0,28	0,31	0,33	0,36	0,03	0,03	0,05
Месяц 2	НМС	-0,13	-0,03	0,62	-0,13	-0,21	-0,26	-0,12	0,02	0,12	-0,09	-0,07	0,14	-0,11	-0,1	-0,03
	ГГО	-0,08	0,02	0,69	-0,14	-0,19	-0,23	-0,01	0,07	0,11	0,09	0,26	0,23	-0,07	-0,11	-0,15
	МК	-0,04	0,07	0,72	-0,06	-0,11	-0,04	0	0,11	0,19	0,08	0,2	0,26	-0,04	-0,04	0

Как видно, для первой недели качество прогнозов ГМЦ и ГГО, как правило, выше климатического. Исключением являются прогнозы осадков, полученные на базе модели ГМЦ. На второй неделе качество прогнозов резко падает. Однако в прогнозах по модели ГГО и на этом временном интервале качество прогнозов полей H-500 и температуры воздуха остается выше уровня климатических прогнозов. На третьей и четвертой неделях значимое превосходство всех методических прогнозов по сравнению с климатом сохраняется только в тропиках для H-500, а также для TRSF, за исключением прогнозов ГМЦ.

Оценки MSSS для первого месяца значимо положительны во всех регионах для прогнозов аномалий H-500 и T-850 по обеим моделям и для прогнозов приземной температуры воздуха по модели ГГО, а в тропиках также и по модели ГМЦ. Особо следует

отметить, что мультимодельные прогнозы на этом временном интервале имеют значимо положительные оценки (содержат полезный сигнал) для всех переменных, за исключением осадков.

Для месячного интервала с двухнедельной заблаговременностью (месяц 2) полезный сигнал прослеживается для всех регионов в прогнозах приземной температуры воздуха по модели ГГО и мультимодельному комплексу. В тропиках различия между оценками MSSS для прогнозов ГГО и ГМЦ менее существенны, причем во многих случаях оценки остаются выше климатических на более длительных интервалах интегрирования. Нельзя не отметить, что для полей H-500 полезный сигнал в тропиках прослеживается на всех интервалах прогноза.

Прогнозы осадков по MSSS значимо положительны только для первой недели: в прогнозах ГГО – за исключением тропиков, в мультимодельных прогнозах – по всем регионам.

В табл. 4 приведены оценки по критерию ρ , характеризующему степень совпадения прогностических и фактических аномалий по знаку. Здесь также прогнозы ГГО для температуры воздуха имеют более высокую оправдываемость по сравнению с прогнозами ГМЦ. Для других характеристик расхождения в оценках незначительны. Обращают на себя внимание высокие оценки ρ для всех методических прогнозов H-500 в тропических широтах на всех интервалах прогноза.

Таблица 4. Средние значения ρ прогнозов ГГО, ГМЦ и мультимодельного комплекса (МК) по территориям Северо-Евразийского региона (СЕР), внетропической зоны Северного полушария (СП) и тропиков (ТР)

Период	Метод прогноза	H-500, дкм			SLP, гПа			T-850, °C			TRSF, °C			PREC, мм/сут		
		СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР	СЕР	СП	ТР
Неделя 1	ГМЦ	0.65	0.66	0.72	0.60	0.57	0.47	0.62	0.57	0.40	0.55	0.52	0.55	0.33	0.32	0.22
	ГГО	0.69	0.70	0.77	0.62	0.59	0.50	0.65	0.59	0.44	0.61	0.60	0.55	0.34	0.34	0.25
	МК	0.70	0.72	0.79	0.65	0.62	0.55	0.67	0.62	0.46	0.63	0.60	0.57	0.36	0.36	0.26
Неделя 2	ГМЦ	0.25	0.31	0.65	0.15	0.17	0.25	0.26	0.25	0.30	0.25	0.28	0.46	0.13	0.13	0.14
	ГГО	0.33	0.39	0.71	0.17	0.19	0.30	0.33	0.31	0.36	0.37	0.40	0.49	0.09	0.11	0.17
	МК	0.33	0.39	0.71	0.20	0.22	0.31	0.33	0.31	0.38	0.35	0.39	0.49	0.13	0.13	0.17
Неделя 3	ГМЦ	0.10	0.22	0.61	0.00	0.01	0.14	0.10	0.16	0.30	0.13	0.23	0.45	0.03	0.06	0.11
	ГГО	0.17	0.28	0.69	0.01	0.05	0.18	0.15	0.21	0.32	0.22	0.32	0.46	0.01	0.04	0.12
	МК	0.15	0.28	0.69	0.01	0.03	0.18	0.25	0.21	0.36	0.20	0.32	0.47	0.01	0.05	0.13
Неделя 4	ГМЦ	0.07	0.23	0.64	0.03	0.04	0.10	0.00	0.15	0.31	0.08	0.24	0.44	-0.02	0.05	0.10
	ГГО	0.05	0.23	0.68	0.01	-0.01	0.14	0.04	0.16	0.31	0.14	0.29	0.45	-0.01	0.03	0.09
	МК	0.07	0.26	0.70	0.03	0.01	0.14	0.04	0.18	0.35	0.14	0.31	0.46	-0.02	0.04	0.10
Месяц 1	ГМЦ	0.31	0.46	0.77	0.24	0.21	0.29	0.30	0.36	0.39	0.29	0.38	0.56	0.14	0.15	0.16
	ГГО	0.40	0.52	0.85	0.26	0.19	0.31	0.40	0.42	0.39	0.44	0.52	0.56	0.14	0.16	0.19
	МК	0.36	0.52	0.85	0.28	0.21	0.32	0.39	0.43	0.42	0.40	0.51	0.58	0.15	0.18	0.20
Месяц 2	НМС	0.16	0.40	0.79	0.13	0.07	0.21	0.10	0.29	0.37	0.15	0.35	0.52	0.04	0.06	0.11
	ГГО	0.17	0.39	0.83	0.05	0.02	0.21	0.16	0.29	0.35	0.26	0.42	0.51	0.02	0.05	0.12
	МК	0.20	0.43	0.85	0.14	0.06	0.24	0.16	0.32	0.40	0.24	0.44	0.53	0.02	0.06	0.14

Успешность вероятностных прогнозов оценивалась по критерию ROC, который рассчитывался по всей совокупности вероятностных прогнозов каждой из трех градаций аномалии прогностической величины [15].

Анализ успешности вероятностных прогнозов по ROC в целом подтвердил ранее сделанные выводы. Наиболее заметные расхождения между прогнозами ГМЦ и ГГО, как и в случае детерминированных прогнозов, отмечались для приземной температуры воздуха. Для осадков уровень успешности прогнозов ГМЦ и ГГО за пределами первой недели практически не отличался от случайного. Вместе с тем следует отметить некоторое расширение временного интервала «полезности» вероятностных прогнозов, особенно для крайних градаций (ниже/выше нормы).

Полезный сигнал прослеживается для обоих месячных интервалов практически по всем прогностическим переменным, причем наиболее устойчивые оценки, заметно превышающие $ROC = 0,5$, соответствуют мультимодельным прогнозам. На рис. 4 показаны оценки ROC по всем прогностическим переменным, полученные по внутропической зоне Северного полушария.

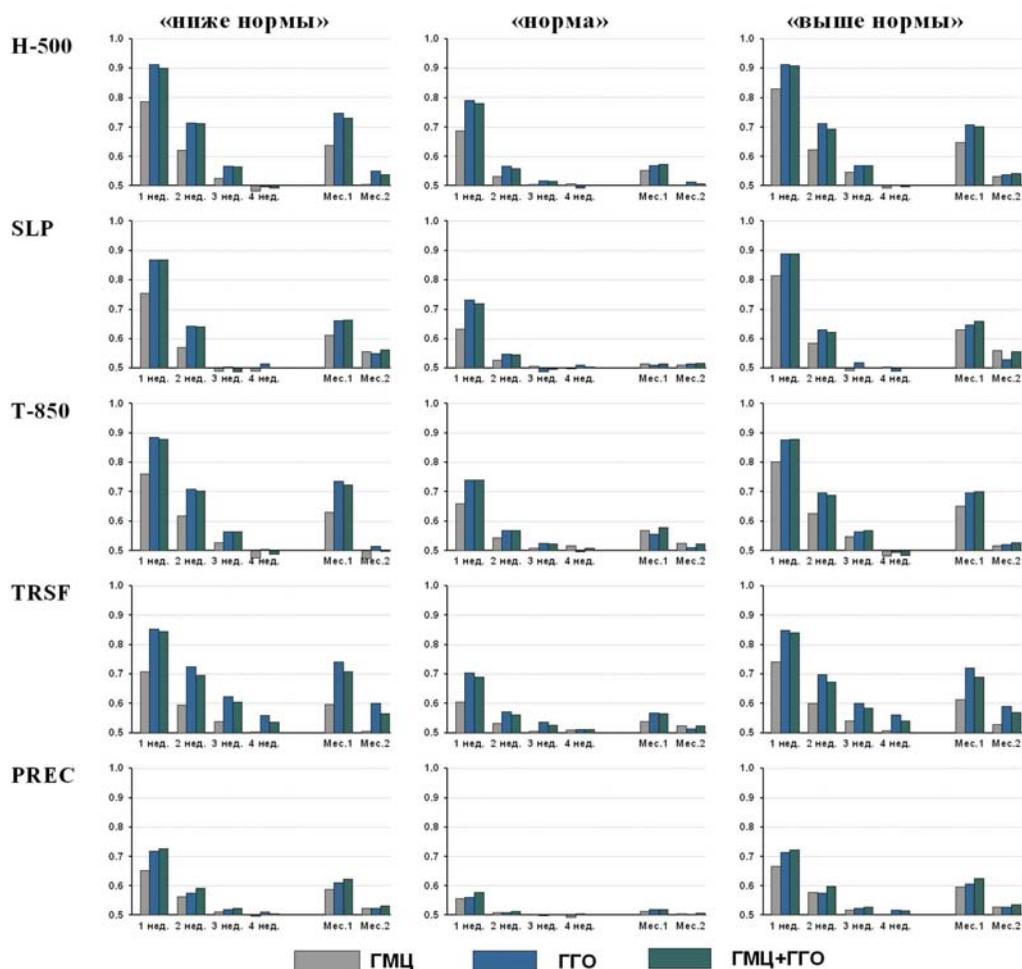


Рис. 4. Оценки ROC вероятностных прогнозов ГМЦ, ГГО и мультимодельного комплекса (ГМЦ+ГГО) по внутропической зоне Северного полушария.

Для градации норма, которая заключена в относительно узкой полосе значений около нормы, характерно общеизвестное ухудшение качества прогнозов по ROC для всех рассматриваемых метеорологических величин.

3.2. Оценки качества прогнозов по станциям

Предусмотренная программой испытаний подготовка прогнозов приземной температуры воздуха и количества осадков в пунктах и оценка их успешности с использованием непосредственных результатов наблюдений на станциях представляют несомненный интерес для потенциальных потребителей прогностической информации и населения. Результаты оценок этих прогнозов по критериям MSSS и ACC, полученные по всему региону и в каждом из трех долготных секторов, приведены в табл. 5. Здесь, как и в табл. 3, выделены графы, для которых оценки были значимо положительны (методические прогнозы превосходили уровень климатического прогноза).

Таблица 5. Средние значения успешности MSSS и ACC прогнозов ГМЦ, ГГО и мультимодельных (МК), рассчитанные для температуры воздуха и осадков по станциям

Период прогноза	Прогнозы температуры воздуха						Прогнозы количества осадков					
	MSSS			ACC			MSSS			ACC		
	ГМЦ	ГГО	МК	ГМЦ	ГГО	МК	ГМЦ	ГГО	МК	ГМЦ	ГГО	МК
Северо-Евразийский регион (70 станций)												
Неделя 1	0.55	0.72	0.71	0.65	0.78	0.77	0.12	0.13	0.16	0.38	0.41	0.46
Неделя 2	0.11	0.37	0.37	0.20	0.40	0.35	-0.05	-0.07	-0.03	0.08	0.11	0.11
Неделя 3	0.01	0.17	0.18	0.04	0.20	0.15	-0.00	-0.11	-0.03	0.03	-0.02	0.00
Неделя 4	0.02	0.11	0.14	-0.01	0.10	0.06	-0.01	-0.13	-0.05	0.01	-0.02	-0.02
Месяц 1	0.26	0.50	0.49	0.22	0.47	0.41	0.02	0.01	0.04	0.17	0.18	0.21
Месяц 2	0.12	0.30	0.30	0.03	0.25	0.20	-0.00	-0.05	-0.00	0.03	0.06	0.06
Европейская часть												
Неделя 1	0.57	0.74	0.74	0.61	0.77	0.73	0.09	0.10	0.14	0.37	0.41	0.43
Неделя 2	0.09	0.26	0.32	0.17	0.32	0.27	-0.06	-0.09	-0.04	0.11	0.16	0.16
Неделя 3	-0.03	0.07	0.11	0.02	0.19	0.11	-0.02	-0.11	-0.04	0.01	0.10	0.08
Неделя 4	0.03	0.05	0.12	0.01	0.13	0.07	-0.02	-0.12	-0.05	-0.05	0.06	0.03
Месяц 1	0.22	0.42	0.45	0.21	0.43	0.36	-0.00	-0.03	0.02	0.13	0.22	0.22
Месяц 2	0.11	0.17	0.25	0.06	0.22	0.21	-0.01	-0.07	-0.01	-0.02	0.12	0.10
Западная Сибирь												
Неделя 1	0.54	0.72	0.70	0.54	0.74	0.69	0.11	0.11	0.15	0.36	0.45	0.48
Неделя 2	0.12	0.40	0.37	0.20	0.45	0.38	-0.00	-0.06	-0.00	0.13	0.13	0.16
Неделя 3	-0.08	0.05	0.06	-0.04	0.18	0.08	0.00	-0.08	-0.02	0.02	-0.01	0.00
Неделя 4	-0.04	0.03	0.06	-0.02	0.18	0.12	0.01	-0.11	-0.04	0.08	-0.04	-0.02
Месяц 1	0.19	0.38	0.40	0.11	0.49	0.38	0.05	0.05	0.08	0.19	0.20	0.24
Месяц 2	0.03	0.12	0.17	-0.10	0.25	0.12	0.03	-0.01	0.03	0.07	0.10	0.09
Восточная Сибирь и Дальний Восток												
Неделя 1	0.54	0.70	0.70	0.64	0.73	0.74	0.13	0.15	0.18	0.38	0.44	0.46
Неделя 2	0.12	0.43	0.40	0.15	0.38	0.31	-0.07	-0.06	-0.03	0.04	0.16	0.19
Неделя 3	0.12	0.33	0.32	0.06	0.20	0.18	0.00	-0.12	-0.03	0.05	0.01	0.05
Неделя 4	0.07	0.22	0.22	0.03	0.15	0.13	-0.01	-0.14	-0.06	0.01	0.07	0.06
Месяц 1	0.32	0.63	0.57	0.23	0.51	0.44	0.01	0.02	0.04	0.14	0.11	0.13
Месяц 2	0.18	0.47	0.41	0.09	0.35	0.29	-0.01	-0.06	-0.02	0.02	0.01	0.01

Данные табл. 5 показывают, что прогнозы температуры воздуха по модели ГГО были точнее климатического прогноза на всех временных интервалах. Соответствующие оценки прогнозов по модели ГМЦ заметно ниже, но в целом по территории были лучше климатических на интервалах первой и второй недель, а также для обоих месячных интервалов. Наименее успешными по данным испытательной выборки были все методические прогнозы температуры воздуха по Западной Сибири (MSSS на периодах третьей и четвертой недель близки к нулю). Оценки мультимодельных прогнозов температуры на всех периодах значимо не отличались от оценок прогнозов ГГО, при этом в ряде случаев они были наилучшими и более устойчивыми во времени и пространстве.

Следует отметить относительно более высокий уровень оценок прогнозов температуры воздуха по MSSS, полученный для Северо-Евразийского региона по станциям, по сравнению с оценками по сеточным полям. Вероятно, главной причиной этого является разница в периодах оценки параметров эталонного климата. Оценки климатических прогнозов при использовании эталона 1961–1990 гг. оказываются заниженными вследствие смещенности в условиях существенной нестационарности временных рядов температуры воздуха. Ошибки RMSE прогнозов ГГО приземной температуры воздуха для этого региона, рассчитанные по станциям, составили в среднем $\sim 2,1$ °C для первого месяца и $\sim 2,5$ °C в прогнозах на месяц с двухнедельной заблаговременностью.

При расчете по сетке аналогичные оценки составляли $\sim 2,0$ °C для первого месяца и $\sim 2,3$ °C для второго месячного интервала.

Оценки прогнозов осадков по критерию MSSS при расчете по станциям, как и по сетке, были лучше климатических только на интервале первой недели. По ACC значимо положительная пространственная корреляция прогностических и фактических аномалий прослеживается на интервалах первой и второй недель и первого месяца. Наилучшие оценки в прогнозах осадков получены для мультимодельных прогнозов.

Оценки вероятностных прогнозов температуры и осадков на станциях по критерию ROC представлены на рис. 5 и 6 соответственно в виде столбчатых диаграмм. Горизонтальная ось всех графиков соответствует значению 0,5, характеризующему уровень климатических прогнозов. Как видно, для температуры воздуха успешность прогнозов ГГО была заметно выше, чем ГМЦ, и в большинстве случаев выше успешности мультимодельных прогнозов.

При увеличении заблаговременности прогнозов значение ROC для мультимодельных прогнозов приближается к оценкам прогнозов ГГО, а в ряде случаев и выше последних. В прогнозах вероятностей крайних градаций полезный сигнал явно прослеживается в прогнозах ГГО и мультимодельного комплекса на интервалах 1–3 недель и обоих месячных

периодов (значения ROC $\sim 0,6$). Оценки прогнозов ГМЦ были несколько ниже, но на интервале 1–2 недель и первого месяца также существенно лучше климатических. Относительно более низкими в период испытаний были оценки по Западной Сибири. Для прогнозов в градации норма оценки ROC за границей двух недель приближаются к 0,5. В месячных прогнозах полезный сигнал проявляется слабо.

Для крайних градаций осадков полезный сигнал уверенно прослеживается в прогнозах на первую неделю и гораздо более слабо на интервале второй недели и первого месяца. Наилучшие оценки везде соответствуют мультимодельным прогнозам. Прогнозы градации «норма» имеют низкие оценки ROC, лишь ненамного превышающие 0,5 даже для прогнозов на первую неделю.

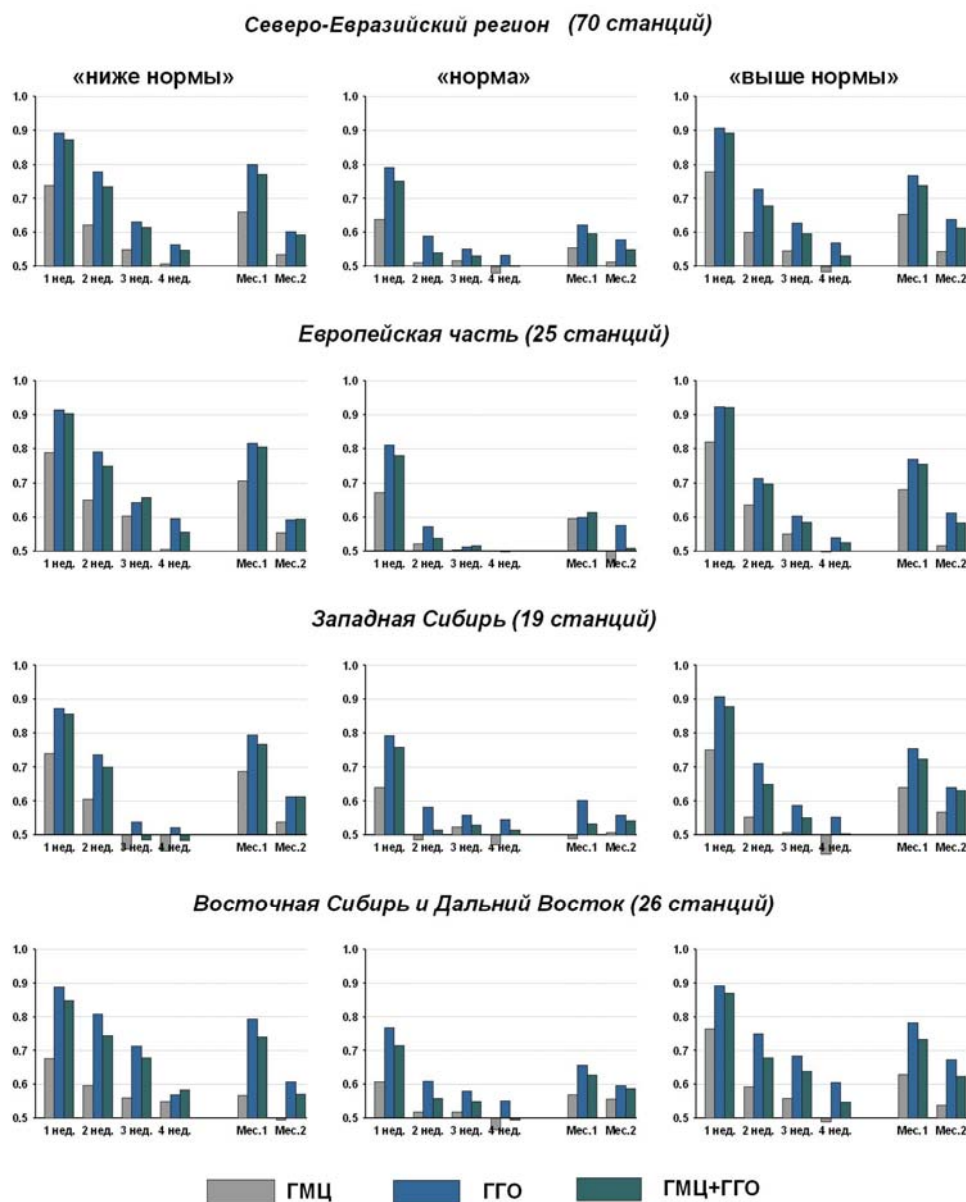
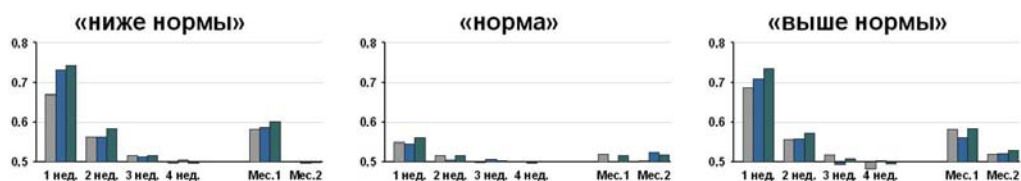
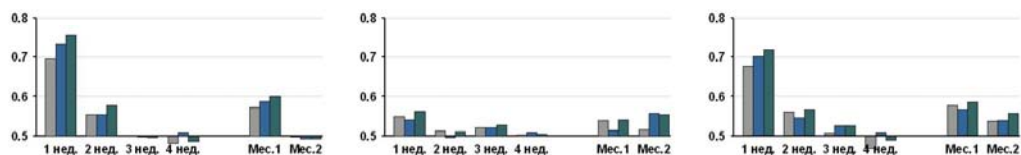


Рис. 5. Интегральные оценки ROC вероятностных прогнозов приземной температуры воздуха по данным метеорологических станций.

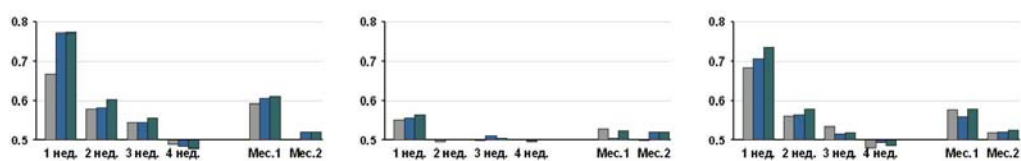
Северо-Евразийский регион (70 станций)



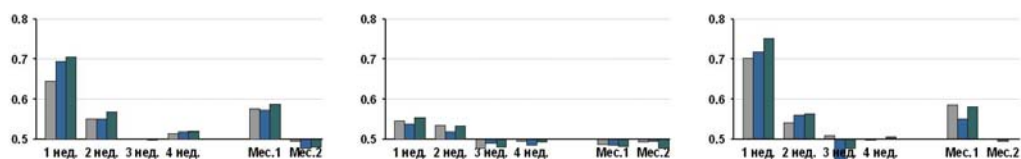
Европейская часть (25 станций)



Западная Сибирь (19 станций)



Восточная Сибирь и Дальний Восток (26 станций)



ГМЦ ГГО ГМЦ+ГГО

Рис. 6. Интегральные оценки ROC вероятностных прогнозов осадков по данным метеорологических станций.

Заключение

Проведенные испытания позволили оценить современные возможности использования моделей атмосферы ГГО и ГМЦ для целей долгосрочного прогнозирования метеорологических условий.

Оценки успешности прогнозов свидетельствуют о наличии полезного сигнала для большинства рассмотренных метеорологических величин во внетропических широтах на недельных (в ряде случаев до 2–3 недель) и месячных интервалах времени, в тропических широтах – для всех рассматриваемых интервалов прогноза. Исключение представляют осадки, прогнозы которых за пределами недельного интервала малоинформативны.

По результатам испытаний наибольшие различия в успешности прогнозов на основе моделей ГГО и ГМЦ отмечались для приземной температуры воздуха на территории

Северной Евразии и Северного полушария (внетропические широты). В тропиках различия в успешности прогнозов невелики.

Использование мультимодельного ансамбля в ряде случаев позволяет повысить показатели успешности, особенно при прогнозе осадков. Для месячных прогнозов наиболее заметные преимущества комплексирования проявляются в оценках полей атмосферного давления. Мультимодельные прогнозы, как правило, характеризуются более устойчивыми показателями успешности и меньше варьируют от прогноза к прогнозу.

Переход от детерминированных (среднее по ансамблю) к вероятностным прогнозам позволяет расширить предел предсказуемости крайних градаций всех рассматриваемых метеорологических величин, кроме осадков. Полезный сигнал прослеживается в недельных прогнозах до 2–3 недель и для обоих месячных периодов прогноза. Для градации «норма» уровень полезной предсказуемости ограничивается первой неделей. Этот же уровень сохраняется и для осадков.

В соответствии с рекомендациями ЦМКП, в оперативную практику в качестве консультативных прогнозов внедрены недельные и месячные прогнозы аномалий H-500, атмосферного давления на уровне моря, температуры воздуха на уровне 850 гПа и у поверхности Земли, а также атмосферных осадков на основе моделей ПЛАВ (ГМЦ), T63L25 (ГГО) и мультимодельного ансамбля на срок до 45 дней. Результаты прогнозов средних по ансамблю аномалий (детерминированные прогнозы), а также вероятностей указанных выше метеорологических величин для трех основных градаций (ниже нормы, норма и выше нормы) с недельным и месячным разрешением регулярно размещаются на сайте Северо-Евразийского климатического центра (<http://neacc.meteoinfo.ru/>).

В ГМЦ и ГГО продолжаются исследования, направленные на улучшение качества прогнозов на основе развития глобальных моделей общей циркуляции атмосферы и океана высокого пространственного разрешения и их совместного использования, улучшения методов параметризации физических процессов, привлечения более полной информации о начальном состоянии атмосферы и океана, оптимизации процедур интерпретации результатов моделирования и построения мультимодельных ансамблей. В ГМЦ подготовлена новая версия модели ПЛАВ [10], на ее основе развивается совместная модель атмосферы, океана и морского льда. Для построения ансамбля начальных данных в дальнейшем будет использоваться алгоритм усвоения данных на основе локального ансамблевого фильтра Калмана с преобразованием ансамбля.

В ГГО создана версия совместной модели океан – атмосфера (МОЦАО), объединяющая блок циркуляции океана ИВМ РАН и версию атмосферной модели T42L25 ГГО, которая успешно апробирована на ретроспективных сезонных прогнозах [5]. В настоящее время

ведутся работы по подготовке прогностической версии МОЦАО с использованием модели атмосферы T63L25 с обновленными параметризациями физических процессов.

Список литературы

1. Киктев Д.Б., Толстых М.А., Зарипов Р.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Тищенко В.А., Хан В.М. Выпуск детализированных метеорологических прогнозов в рамках деятельности Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) // Труды Гидрометцентра России. – 2017. – Вып. 366. – С. 14-28.
2. Мелешко В.П., Матюгин В.А., Спорышев П.В., Павлова Т.В., Говоркова В.А., Школьник И.М., Байдин А.В. Модель общей циркуляции атмосферы ГГО (версия MGO-03 T63L25) // Труды ГГО. – 2014. – Вып. 571. – С. 5-87.
3. Мирвис В.М., Львова Т.Ю., Матюгин В.А. Новая технология ансамблевого гидродинамического прогноза на 45 суток и региональные оценки успешности прогнозов для Северной Евразии // Труды ГГО. – 2014. – Вып. 570. – С. 5-33.
4. Мирвис В.М., Мелешко В.П., Львова Т.Ю., Матюгин В.А. Пятилетний опыт оперативного прогнозирования метеорологических условий на срок до 45 суток на основе модели общей циркуляции атмосферы ГГО (версия MGO-3 T63L25) // Труды Гидрометцентра России. – 2017. – Вып. 366. – С. 29-50.
5. Мирвис В.М., Мелешко В.П., Львова Т.Ю., Матюгин В.А., Байдин А. В. Прогностические эксперименты на основе совместной модели океан – атмосфера ГГО // Труды ГГО. – 2016. – Вып. 583. – С. 129-148.
6. Муравьев А.В., Вильфанд Р.М. О стандартизации оценок качества прогнозов на средние и долгие сроки // Метеорология и гидрология. – 2000. – № 12. – С. 24-34.
7. Пичугин Ю.А., Мелешко В.П., Матюгин В.А., Гаврилина В.М. Гидродинамические долгосрочные прогнозы погоды по ансамблю начальных состояний // Метеорология и гидрология. – 1998. – № 2. – С. 5-15.
8. РД.52.27.284-91. Методические указания по проведению производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиофизических прогнозов. – 150 с.
9. Толстых М.А. Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды. – М.; Обнинск: ОАО ФОР, 2010. – 111 с.
10. Толстых М.А., Шашкин В.В., Фадеев Р.Ю., Шляева А.В., Мизяк В.Г., Рогутов В.С. Богословский Н.Н., Гойман Г.С., Махнорылова С.В., Юрова А.Ю. Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза. – М.: Триада лтд, 2017. – 66 с.

11. Эфрон Б. Нетрадиционные методы многомерного статистического анализа. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 263 с.
12. Hollingsworth A., Arpe, K., Tiedtke M. et al. The Performance of a Medium_Range Forecast Model in Winter-Impact of Physical Parameterization // Mon. Wea. Rev. – 1980. – Vol. 108. – P. 1736-1773.
13. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S-K., Hnilo J. J., Fiorino M., Potter G. L. NCEP–DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // Bull. Amer. Meteor. Soc. – 2002. – Vol. 83. – P. 1631-1643.
14. Reynolds R.W., Rayner N.A., Smith T.M., Stokes D.C., Wang W. An Improved In Situ and Satellite SST Analysis for Climate // J. Climate. – 2002. – Vol. 15. – P. 1609-1625.
15. Standardized Verification System (SVS) for Long-Range Forecasts (LRF) // New Attachment II-9 to the Manual on the GDPS (WMO-No. 485). Vol. I. – Geneva: WMO, 2002. – 24 p.
16. Toth Z., Kalnay E. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method // Mon. Wea. Rev. – 1997. – Vol. 125. – P. 3297-3319.