

УДК 551.509

ПЯТИЛЕТНИЙ ОПЫТ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА СРОК ДО 45 СУТОК НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ ГГО (ВЕРСИЯ MGO-3 T63L25)

В.М. Мирвис, В.П. Мелешко, Т.Ю. Львова, В.А. Матюгин

*Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, г. Санкт-Петербург
mirvis@main.mgo.rssi.ru, meleshko@main.mgo.rssi.ru,
lvova@main.mgo.rssi.ru, matugin@main.mgo.rssi.ru*

В статье анализируется опыт ГГО по прогнозированию средних недельных и месячных метеорологических условий на основе модели общей циркуляции атмосферы T63L25 на срок до 45 суток. Изложена технология еженедельного выпуска прогнозов на два месячных периода (с суточной и двухнедельной заблаговременностью) и еженедельной детализацией для первых четырех недель. Комплект прогнозов содержит глобальные сеточные значения аномалий в непрерывной шкале и вероятности 3-х градаций для пяти основных метеорологических элементов, а также прогнозы приземной температуры воздуха и осадков по 70 станциям Северо-Евразийского региона. Рассмотрены глобальные и региональные оценки качества прогнозов.

Ключевые слова: детализированный месячный метеорологический прогноз, модель общей циркуляции атмосферы, вероятностный прогноз, глобальные и региональные оценки качества прогнозов.

Введение

Успехи гидродинамического моделирования процессов в атмосфере и климатической системе в целом, достигнутые в мировой науке на базе современных суперкомпьютерных технологий, обеспечили возможность использования моделей общей циркуляции атмосферы (МОЦА), а также совместных моделей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) в расчетах эволюции метеорологических условий на длительные сроки (месяц, сезон) с перспективой построения бесшовных технологий прогнозирования погоды и климата. Благодаря физической обоснованности, успешности и технологическим возможностям, включающим ансамблевые расчеты и вероятностные оценки неопределенности, методы месячных и сезонных прогнозов на основе МОЦА и МОЦАО находят активное применение в практике передовых прогностических центров, все больше вытесняя методы, полностью основанные на эмпирико-статистическом подходе. Попытки сравнения успешности гидродинамических и статистических прогнозов, предпринятые в ряде исследований [2, 6],

показывают, что качество прогнозов, выполненных на основе современных физически полных МОЦА, в среднем не только не уступает оценкам статистических прогнозов, но оказывается, как правило, существенно лучше. Однако следует признать, что степень неопределенности долгосрочных прогнозов остается весьма значительной, и при увеличении заблаговременности до 20–30 суток она приближается к естественной климатической изменчивости. При крайней практической заинтересованности в долгосрочных прогнозах, уровень их успешности не удовлетворяет запросам потенциальных потребителей.

Сложность и ресурсоемкость исследований по гидродинамическому долгосрочному прогнозу, глобальный охват рассматриваемых процессов потребовали объединения усилий в международном масштабе. В последние годы были инициированы многие совместные проекты, координирующие исследования передовых научных коллективов и нацеленные на построение мультимодельных ансамблевых прогнозов.

В России развитие методов ансамблевых гидродинамических прогнозов на месяц и сезон осуществляется в двух научных центрах Росгидромета – ФГБУ «Гидрометцентр России» (ГМЦ) и ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова» (ГГО). В ГГО для исследований по климату и долгосрочному прогнозу поэтапно разрабатывались версии спектральной МОЦА с различным пространственным разрешением, которые прошли апробацию в международных экспериментах (AMIP-I, AMIP-II, SMIP, SMIP-HFP). Выпуск оперативных прогнозов на срок до сезона осуществляется в настоящее время на основе технологий, успешно прошедших совместные с ГМЦ оперативные испытания [3] и использующих версии МОЦА T42L14 [15] и T63L25 [4]. Прогнозы ГГО используются в прогностической деятельности ГМЦ и информационном обеспечении СЕАКЦ, участвуют в международном проекте по мультимодельному сезонному прогнозу АРСС [18]. В последние годы в ГГО создана также совместная модель динамики океана и атмосферы, объединяющая атмосферную модель T42L25 с блоком океанической циркуляции, разработанным в ИВМ РАН, которая успешно апробирована для прогнозирования на срок до 4 месяцев с использованием исторических данных реанализа за 22 года [11].

Традиционно месячные и сезонные прогнозы предполагают оценку метеорологических условий, осредненных за весь период прогноза (месяц или сезон). Более детальная информация содержится в краткосрочных и среднесрочных прогнозах, которые охватывают период не более 5–10 дней. За пределами этого срока, как правило, имеется только прогноз в целом на календарный месяц, который составляет накануне начала месяца. Анализ показывает, что успешность таких прогнозов во многом обеспечивается действием «атмосферной памяти», быстро угасающей на интервале 2–3 недель от выпуска прогноза. Увеличение заблаговременности, в котором крайне заинтересованы потенциальные потребители, приводит к существенному снижению качества прогнозов. В редких

случаях непредвиденная ломка атмосферных процессов в начале периода приводит к провалу месячного прогноза, который обреченно фиксируется прогнозистом. Потребители же оказываются лишенными адекватной прогностической оценки на дальнюю перспективу.

Источники предсказуемости, способные повысить качество прогнозов во временном интервале до 45–60 суток, являются предметом пристального внимания исследователей, поскольку с ними связаны главные надежды на возможность практического использования долгосрочных прогнозов при учете метеорологических и гидрологических условий в энергетике, сельском хозяйстве, на транспорте, в поддержании безопасного жизнеобеспечения населения. На повышение качества прогнозирования в указанном временном интервале нацелен международный проект «Subseasonal to Seasonal Prediction Project» (S2S) стартовавший в 2013 году под эгидой международных программ BMO WWRP/THORPEX/WCRP [23].

В данной статье подробно анализируется многолетний опыт ГГО по прогнозированию средних недельных и месячных метеорологических условий в интервале до 45 суток на основе МОЦА T63L25 в режиме еженедельного оперативного прогноза. Эти результаты сопоставляются с предварительными оценками, полученными на материале исторических прогнозов, частично опубликованными в [8].

Технология прогнозов и использованные данные

Характеристика модели и исходных данных

Ядром прогностической технологии является физически полная глобальная спектральная МОЦА T63L25, подробное описание которой содержится в [4]. Горизонтальное разрешение модели $1,9^\circ \times 1,9^\circ$, приблизительно 190 км, по вертикали учитывается 25 уровней в сигма системе координат, шаг по времени составляет ~10 минут. Увеличение разрешения модели по сравнению с предшествующей версией T42L14 позволило более точно прогнозировать эволюцию начального состояния на периоде детерминированной предсказуемости, а также улучшить описание процессов в верхней тропосфере и нижней стратосфере. В новой версии модели использован прежний блок параметризаций основных физических процессов, за исключением учета гравитационно-волнового сопротивления и горизонтальной диффузии, которые зависят от разрешения модели и требуют специальной настройки. В результате валидации модели были изменены некоторые коэффициенты и условия, использующиеся в схемах параметризации физических процессов. Произведенные изменения позволили уменьшить систематические ошибки.

В качестве начальных данных о состоянии атмосферы, вводимых в модель на старте, используются данные объективного анализа атмосферных полей по сетке ($2,5^\circ \times 2,5^\circ$), выполняемого в ГМЦ. При задании начального состояния температуры поверхности океана (ТПО) и

концентрации морского льда используются результаты их еженедельного анализа, размещаемые на сайте (<http://iridl.ldeo.columbia.edu> [20]).

Граничные условия формулируются в предположении постоянства начальных аномалий ТПО на всем периоде интегрирования, начальные аномалии концентрации морского льда удерживаются неизменными в течение 21 суток, с последующей релаксацией к климатическому распределению.

Для построения вероятностных прогностических распределений в технологии предусмотрен расчет ансамбля прогнозов, стартующих от слабо возмущенных начальных полей, построение которых, как и ранее, осуществлялось на основе выращивания возмущений с помощью модели [13]. В настоящее время используется ансамбль из девяти прогнозов, один из которых рассчитывается по невозмущенным начальным полям и восемь – по возмущенным.

Результаты расчетов эволюции глобальных прогностических полей, представленных в сетке $2,5^\circ \times 2,5^\circ$, для пяти характеристик: геопотенциала поверхности 500 гПа (H500), давления на уровне моря (SLP), температуры воздуха на уровне 850 гПа (T850) и у земли (TRSF), а также интенсивности атмосферных осадков (PREC), осредненные по суткам за 1–45 сутки, запоминаются и используются для формирования пакета выходного комплекта прогностической информации на этапе постобработки.

Все прогнозы по МОЦА T63L25 выполнялись на суперкомпьютерном комплексе Kraftway (кластере, 108 узлов) с пиковой производительностью 0,7 Tflor/s. В настоящее время технология реализована также на сервере SuperMicro (4 процессора по 8 ядер). Время счета одного ансамблевого прогноза составляет около 6–7 часов.

Состав прогностических величин

Выходной прогностический комплект по каждой характеристике включает поля аномалий, осредненных по времени для шести прогностических периодов: 1, 2, 3, 4-ю недели (2–8, 9–15, 16–22, 23–29 сутки) и два месячных временных отрезка (2–31 и 16–45 сутки), именуемых в дальнейшем, соответственно, *месяц 1* и *месяц 2*. В следующем выпуске прогноза все периоды сдвигаются на одну неделю. Величина прогностической аномалии в каждой точке рассчитывается по результатам девяти ансамблевых прогнозов как отклонение среднего по ансамблю значения, скорректированного на величину систематической ошибки, от соответствующей нормы (среднего значения) эталонного климатического ряда. Таким образом, величина аномалии является выборочной оценкой математического ожидания прогностического вероятностного распределения. Кроме этого, по ансамблю прогнозов рассчитываются вероятности попадания аномалии в три заранее установленные градации («ниже нормы», «норма», «выше нормы»). Границами градаций являются

процентили 33,3 % распределений эталонных климатических рядов. Таким образом, выходной комплект включает для каждой из пяти метеорологических характеристик в каждой точке глобальной сетки $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ прогностические оценки четырех величин (средняя аномалия и три значения вероятности осуществления градаций «ниже нормы», «норма», «выше нормы») в каждом из шести периодов прогноза.

Технология предусматривает также детализацию прогнозов приземной температуры воздуха и количества осадков для отдельных пунктов. В настоящее время прогнозы рассчитываются по сети 70 станций, расположенных в Северо-Евразийском регионе. Расчеты суточных прогностических значений в пунктах осуществляются по сеточным данным четырех ближайших узлов посредством билинейной интерполяции.

Оценки эталонного климата

Важной частью прогностической системы является подготовка параметров эталонного климата. Необходимо отметить, что в каждой точке прогноза необходимо иметь параметры, характеризующие распределение характеристик недельного и месячного осреднения для любой фазы в годовом цикле. Подготовка этих данных включала расчеты и обработку эталонных временных рядов по историческим архивам. Для глобальных данных использовались архивы Реанализа 2 [17] за период с 1981 по 2010 год, а для данных на станциях – архивы суточных данных ВНИИГМИ-МЦД [19]. К сожалению, использование периода 1981–2010 гг. для станций оказалось затруднительным по причине многочисленных пропусков в данных наблюдений с начала 90-х годов прошлого столетия, поэтому климатические параметры для станций определялись за 30-летие (1961–1990 гг.).

Для расчета климатических параметров анализировались 30-летние временные ряды, относящиеся к одноименным календарным отрезкам. Начало отрезков (периодов осреднения) смещалось по суткам, пробегая все 365 дней года. Таким образом, по каждой характеристике анализировалось 365 рядов средненедельных значений и столько же – среднемесячных. Кажущийся более простым путь – определение параметров климата недельных или месячных средних на основе преобразования характеристик климата суточных значений возможен только в отношении норм. Пересчет параметров изменчивости требует учета временной связности, меняющейся и в пространстве, и в сезонном ходе, корректный учет которой весьма сложен.

Полученные выборочные значения параметров климата содержат заметную шумовую составляющую, под влиянием которой их годовой ход не является гладким, а испытывает дрожание. Фильтрация выборочных ошибок производилась посредством аппроксимации годового хода параметров климата усеченным разложением Фурье с использованием первых четырех гармоник. Более подробно о подготовке параметров эталонного климата см. [8].

Коррекция систематических ошибок

Необходимым этапом подготовки прогнозов на основе гидродинамических моделей является оценка и коррекция систематических ошибок. Эти ошибки возникают вследствие отличия климата модельной атмосферы от реального климата. На периоде прогноза, в условиях неустановившегося еще климата модели, различие климатов меняется (дрейфует) во времени. Для оценки систематических ошибок, соответствующих каждому временному интервалу, необходимо иметь ряды исторических прогнозов (hindcasts) и соответствующих им фактических данных.

Выполнение многолетних серий исторических прогнозов является исключительно ресурсоемкой задачей, поскольку требуется получить оценки для каждого дня (календарной даты) выпуска прогноза в годовом цикле. Распространенным способом коррекции смещения является представление конечных прогнозов в виде отклонений от модельного климатического среднего. Для оценки параметров модельного климата на дату старта прогноза используются ряды исторических прогнозов, рассчитанных от той же даты.

В технологии ГГО использована несколько видоизмененная и более экономичная стратегия. Непрерывный годовой ход систематических ошибок для каждой прогностической переменной воспроизводился по историческим рядам прогнозов, рассчитанных с полумесячной дискретностью за 1982–2001 гг. (всего 480 прогнозов) на основе Фурье аппроксимации средних разностей прогноз – факт [7]. Такой подход позволяет точнее воспроизвести годовой ход ошибок, поскольку масштаб колебаний для разностей модельных и фактических климатических средних существенно меньше колебаний каждого из них, а выборочные ошибки средней разности положительно коррелированных величин меньше, чем ошибки самих средних.

Подготовка вероятностных прогнозов.

Для оценки вероятности попадания прогностической величины в заданную градацию осуществляется подсчет числа индивидуальных ансамблевых прогнозов, попавших в эту градацию, с последующим делением на общее число членов ансамбля. При этом рассматриваются индивидуальные некорректированные прогнозы, а границы градации соответствуют модельному климатическому распределению. При ансамбле из девяти прогнозов значения вероятностей кратны $1/9$, т. е. определяются довольно грубо.

В прогнозах приземной температуры воздуха по станциям был реализован альтернативный вариант расчета вероятностей, основанный на предположении о нормальном распределении ансамбля и корректировке обоих параметров – и среднего, и стандартного отклонения. Подробное изложение этого подхода содержится в [9]. В исследовании [10] показано, что корректировка параметра изменчивости положительно сказывается на

оценках вероятностных прогнозов, а также то, что использованный метод коррекции не уступает методу, основанному на байесовской модели осреднения (ВМА).

Оценки успешности прогнозов

Оценки успешности предполагают сравнение прогноза с фактом, установленным по данным наблюдений. Для потребителей часто важны количественные значения ошибок прогнозов и процент прогнозов, которые при заданном допуске классифицируются как оправдавшиеся. Исследователи, оценивая полезность долгосрочных прогнозов, интересуются, уточняют ли они климатическую информацию и, если да, то насколько.

Методическими указаниями [5] для количественной оценки прогнозов, данных в непрерывной шкале, рекомендованы расчеты средних ошибок (арифметических, абсолютных, квадратических), имеющих размерность, и безразмерных критериев: относительных ошибок, соотносящих ошибки прогноза с климатической изменчивостью, коэффициентов корреляции прогностических и фактических аномалий, а для прогнозов бинарного признака (знака аномалии) – индекс ρ .

Активизация международного сотрудничества в области долгосрочных прогнозов потребовала стандартизации подходов и критериев оценки прогнозов, в том числе для прогнозов, данных в вероятностной форме. Результаты этой деятельности сформулированы в [21] и подробно прокомментированы в [12]. В качестве первоочередных показателей были рекомендованы среднеквадратический показатель оправдываемости (MSSS), характеризующий уменьшение среднего квадрата ошибки методического прогноза относительно ошибки климатического прогноза, а также для категориальных вероятностных прогнозов – сравнительная оперативная характеристика ROC (relative operating characteristic), соотносящая доли оправдавшихся прогнозов и ложных тревог.

Исходя из этих рекомендаций для анализа успешности прогнозов рассчитывались средние ошибки величины аномалии (в непрерывной шкале): арифметические (ME), квадратические ($RMSE$), относительные (Q), коэффициенты корреляции аномалий (AC), индексы ρ , показатель MSSS. При анализе качества вероятностных прогнозов – ROC.

Эталонные фактические значения аномалий для оценки глобальных прогнозов в сетке рассчитывались исходя из 6-часовых данных Реанализа 2, а фактические значения температуры воздуха и осадков на станциях – по суточным данным поддерживаемой ГМЦ базы МАКТ [1].

Результаты независимых испытаний технологии прогнозов

В [8] были сопоставлены результаты оценок прогнозов двух серий исторических прогнозов: ряда 1982–2001 гг. (480 прогнозов), использованного для оценки систематических ошибок, и независимой выборки

2002–2011 гг. (522 прогноза). При этом были рассмотрены только прогнозы приземной температуры воздуха и осадков в Северо-Евразийском регионе. Начиная с 2012 года в рамках оперативных испытаний, организованных совместно с ГМЦ, технология прогнозов была запущена в режиме оперативного еженедельного прогноза. В период с апреля 2012 г. по март 2017 г. было выпущено 259 прогнозов, результаты которых передавались в ГМЦ, до начала прогностического периода. В рамках данной статьи рассмотрены основные результаты этой серии прогнозов по всей совокупности прогностических переменных. Успешность сеточных глобальных прогнозов оценивалась по глобусу в целом, а также по регионам: тропики (20° с. ш. \times 20° ю. ш.), северные экстратропики (90° с. ш. \times 20° с. ш.) и Северо-Евразийский регион*.

Отметим, что критерии оценки прогнозов могут рассчитываться на основе осреднения по пространственной области (для каждого прогноза), с последующим осреднением по совокупности прогнозов, или на основе осреднения по совокупности прогнозов в каждой точке, с последующим осреднением по пространству. И в том, и в другом случаях при рассмотрении критериев, характеризующих ошибки прогнозов в их абсолютном выражении ($f_{i,j} - x_{i,j}$, где $f_{i,j}$ – значение i -го прогноза в точке j ; $x_{i,j}$ – соответствующее фактическое значение), обобщаются данные, неоднородные по климатической изменчивости. Рекомендация [21], не смешивать результаты проверок, относящиеся к разным сезонам, требует для получения статистически надежных выводов длительных (многолетних) испытаний, которые обычно не практикуются.

При анализе успешности прогнозов по относительно коротким временным рядам (5–10 лет) целесообразно ориентироваться на относительные критерии Q и AC . Если перейти к рассмотрению стандартизированных прогностических и фактических аномалий (\hat{f}_i и \hat{x}_i), выраженных в долях соответствующего эталонного значения стандарта климатической изменчивости (sd), то относительная ошибка методического прогноза определяется как средний квадрат их разности:

$$Q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{f}_i - \hat{x}_i)^2.$$

$$\text{Для климатического прогноза } \hat{f}_i = 0, \text{ а } Q_{cl} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (-\hat{x}_i)^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{x}_i)^2$$

характеризует средний квадрат стандартизированных фактических аномалий в испытательной выборке. При расчете по выборке эталонного климата $Q_{cl}=1$. Оценки Q_{cl} по данным испытательной выборки

* Регион включает сферические трапеции: $77,5^\circ$ – $42,5^\circ$ с.ш., 20° – 145° в.д., $77,5^\circ$ – 50° с.ш., $147,5^\circ$ – 180° в.д.(933 точки)

отличаются от единицы и тем больше, чем большими аномалиями характеризовались фактические атмосферные условия.

Для оценки мастерства методических прогнозов, по сравнению с климатом по результатам испытательной выборки 2012–2017 гг., использовался критерий QS :

$$QS = 1 - \frac{Q}{Q_{cl}},$$

а также средний коэффициент пространственной корреляции прогностических и фактических аномалий AC .

Результаты глобальных и региональных оценок прогнозов для каждой из прогнозируемых переменных (H500, T850, T2м, SLP, PREC) по критериям QS и AC за 2012–2017 гг. обобщены на рис. 1. Столбчатыми диаграммами, объединенными в группы, слева направо показаны средние оценки для каждого из шести периодов прогноза. Внутри каждой группы слева направо представлены оценки, рассчитанные по глобусу в целом, тропикам, северным экстратропикам и Северо-Евразийскому региону.

На графиках видно закономерное снижение качества прогнозов по мере увеличения заблаговременности от первой недели к четвертой и от месяца 1 к месяцу 2. Вместе с тем результаты показывают, что для всех переменных и прогностических периодов средние значения AC значимо положительны. Это касается всех рассмотренных регионов. В тропиках заметно относительно более медленное снижение AC , особенно при рассмотрении прогнозов давления на уровне моря и приземной температуры воздуха, изменчивость которой испытывает демпфирующее влияние океана.

Критерий QS сохраняет положительные значения за пределами двухнедельного интервала только для прогнозов H500 (кроме оценок для Северо-Евразийского региона) и T2м, причем прогнозы T2м на 4-ю неделю в Северо-Евразийском регионе по Q уже не отличаются от климата. Прогнозы T850 уступают по качеству прогнозам T2м, хотя и имеют положительные оценки QS для обоих месячных периодов. Для прогнозов SLP значения QS положительны или равны нулю только на периодах 1-й и 2-й недель. В северных экстратропиках и Северо-Евразийском регионе слабо положительные значения QS получены также для месяца 1. Самые низкие оценки получены для прогнозов количества осадков. Все оценки QS за пределами первой недели оказались отрицательными, а в тропиках плохими были прогнозы даже на первую неделю. Следует заметить, что осадки, с их большой пространственно-временной изменчивостью, являются трудной характеристикой как для прогнозирования, так и для оценки прогнозов. Применение к ним выше указанных критериев, строго говоря, некорректно по причине существенного отличия их распределения от нормального. Более корректны результаты оценки вероятностных прогнозов трех градаций осадков, рассмотренные далее.

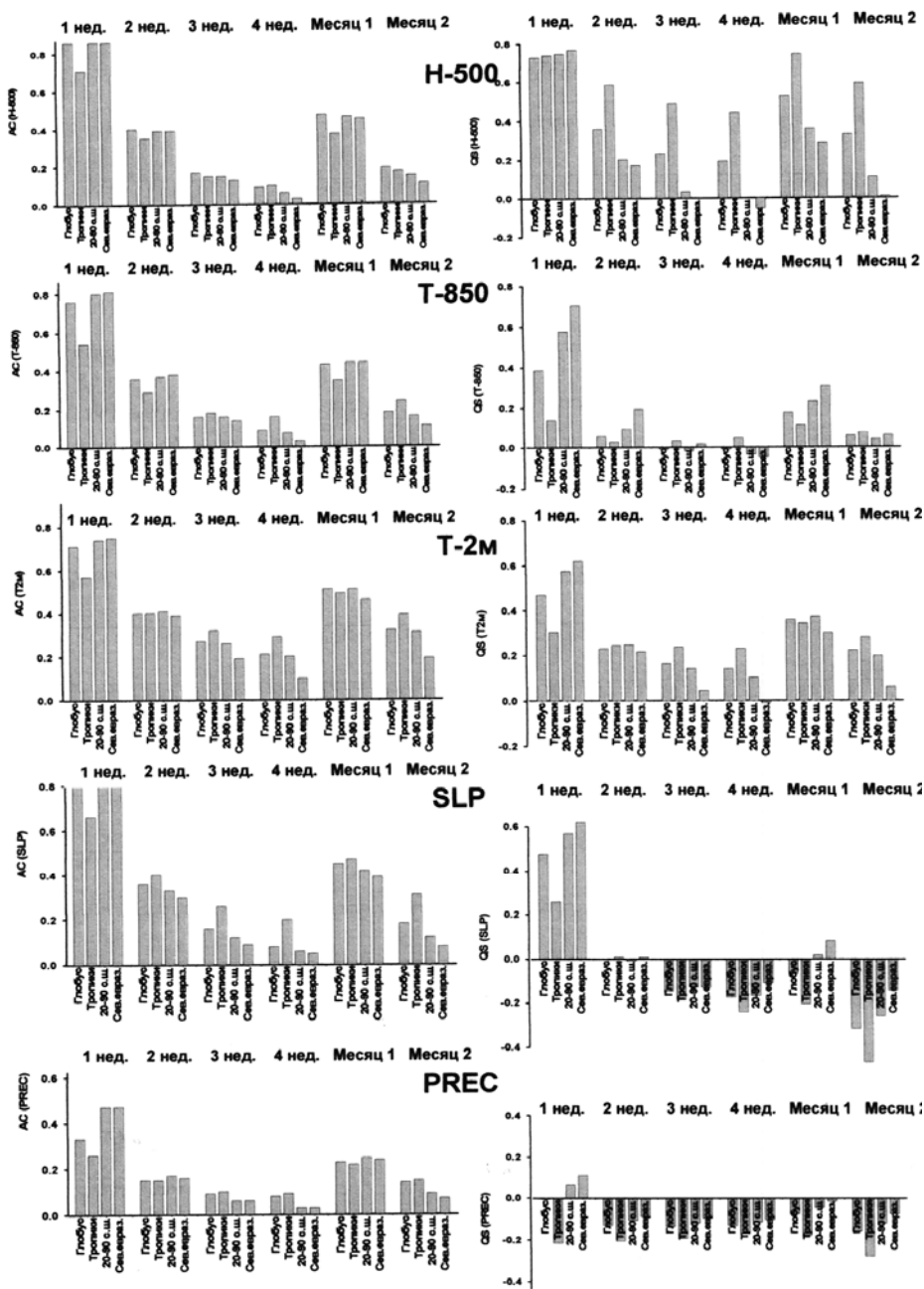


Рис. 1. Средние ошибки прогнозов по критериям AC (слева) и QS (справа) за 2012–2017 гг.

Подводя итог можно констатировать, что наиболее успешными являются результаты прогнозов H500 и приземной температуры воздуха. Сочетание положительных значения AC и неотрицательных QS свидетельствует о том, что эти прогнозы для всех периодов уточняют климатическую информацию. Важно, что этот результат получен при использовании эталонного климата периода 1981–2010 гг., практически примыкающего к началу оперативных испытаний.

Большой интерес представляет анализ успешности прогнозов приземной температуры на станциях по данным наблюдений. Учитывая то, что характер изменчивости температуры воздуха существенно меняется в пространстве и в годовом ходе, целесообразно сравнивать и обобщать стандартизированные прогностические и фактические аномалии. На рис. 2 а показано совместное распределение стандартизированных прогностических (\hat{f}_i) и фактических (\hat{x}_i) аномалий, построенное по всем случаям станционных месячных прогнозов за 2012–2017 гг., составленных с нулевой заблаговременностью. Распределение прогностических аномалий характеризуется относительно меньшим рассеянием (по сравнению с рассеянием фактических аномалий). Это во многом объясняется тем, что прогностические аномалии являются результатом осреднения по ансамблю прогнозов. Средние значения обоих частных распределений близки по величине и оба смещены относительно нуля в область положительных аномалий. Коэффициент корреляции между прогностическими и фактическими аномалиями для этого периода составил 0,54.

Удобным способом графического представления параметров совместного распределения прогностических и фактических аномалий является диаграмма Тейлора [22]. Положение каждой точки на диаграмме определяется значениями стандартного отклонения (радиальное расстояние до начала координат) и коэффициента корреляции между прогностическими и фактическими аномалиями (косинус углового расстояния). Компактное представление результатов на диаграмме Тейлора особенно удобно при сравнении большого набора выборок, для разных периодов и разных методик. На диаграмме (рис. 2 б) представлены результаты оценок для прогнозов T2м на станциях, полученные по историческим прогнозам 2002–2011 гг. (красным цветом) и оперативным прогнозам 2012–2017 гг. (синим цветом). Оценки прогнозов на 1, 2, 3, 4-ю недели показаны кружками с соответствующими цифрами. Закрашенными квадратами с цифрами 5 и 6 показаны результаты прогнозов на месяц 1 и месяц 2 соответственно. Для приведения результатов к одному масштабу значения стандартных отклонений каждой выборки выражены в долях стандартного отклонения эталонных данных. Эталонным данным соответствует кружок, отмеченный на горизонтальной оси на единичном расстоянии от начала координат. Расстояние между этой точкой и точками прогнозов характеризует величину централизованной квадратической ошибки прогнозов.

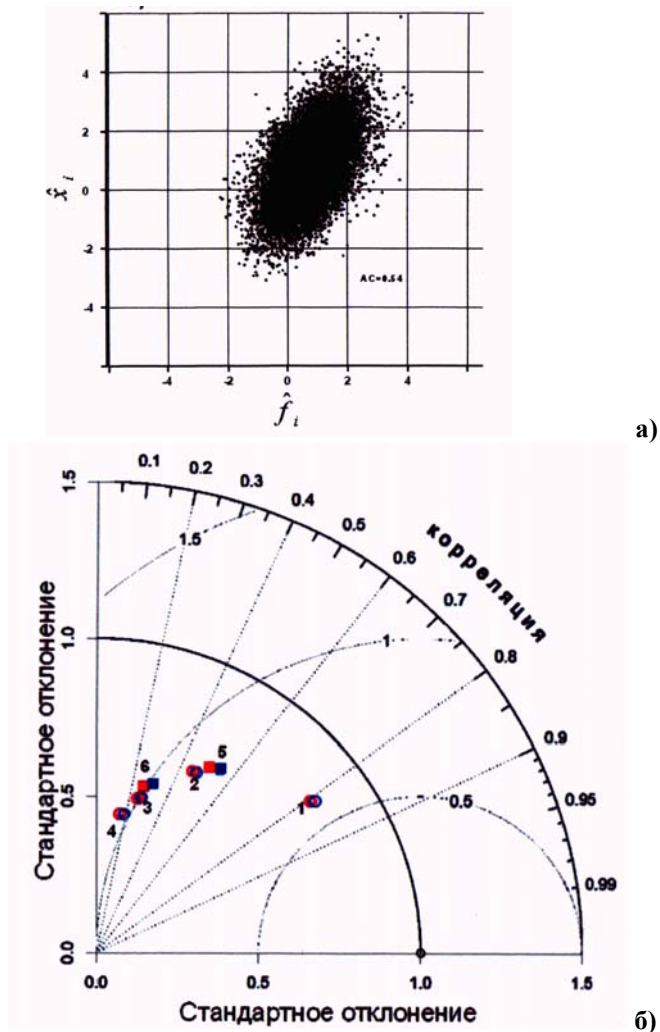


Рис. 2. Совместное распределение стандартизованных прогностических и фактических аномалий: совокупность станционных прогнозов на месяц с нулевой заблаговременностью за 2012-2017 гг. (а); диаграмма Тейлора по данным прогнозов за 2002–2011 гг. (красный цвет) и 2012–2017 гг. (синий цвет), результаты недельных прогнозов на 1, 2, 3, 4 недели отмечены кружками и цифрами (номер недели), результаты прогнозов на месяц 1 и месяц 2 отмечены закрашенными квадратами и цифрами 5 и 6 соответственно (б).

Рис. 2 б наглядно показывает, что красные и синие значки почти совпадают. Следовательно, качество оперативных прогнозов 2012–2017 гг. по сравнению с данными исторической выборки 2002–2011 гг. не изменилось. При переходе от прогнозов на начало месяца (1-я неделя) к концу (4-я неделя), так же как и при увеличении заблаговременности в

месячном прогнозе, характерно последовательное уменьшение стандартных отклонений прогностических аномалий и коэффициентов корреляции. Центрированные квадратические ошибки при этом увеличиваются и приближаются для 4-й недели и месяца 2 к единице, соответствующей в данном случае уровню ошибок климатического прогноза. Коэффициенты корреляции между прогностическими и фактическими аномалиями уменьшаются от 0,8 для 1-й недели до 0,2 для 4-й недели.

Примеры распределений стандартизированных ошибок методических прогнозов ($\hat{f}_i - \hat{x}_i = (f - x) / sd$) в сравнении с распределениями ошибок климатического прогноза показаны на гистограммах рис. 3. Преимущество методических прогнозов состоит в уменьшении диапазона возможных ошибок и повторяемости на краях распределения, при увеличении повторяемости ошибок, близких к нулю. Особенно хорошо это заметно по прогнозам на 1-ю неделю, но прослеживается и в месячных прогнозах, включая месячный прогноз с 2-недельной заблаговременностью. Графики демонстрируют также выраженное смещение ошибок климатического прогноза влево, являющееся следствием глобального потепления.

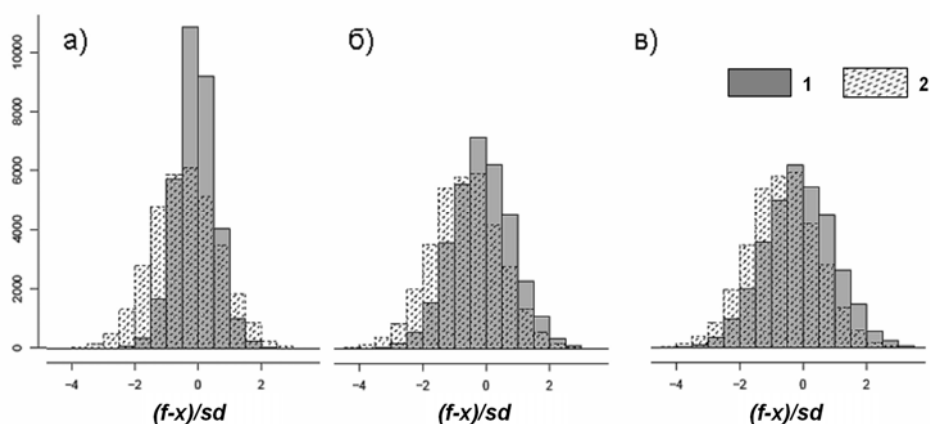


Рис. 3. Гистограммы распределения (частота) ошибок методических(1) и климатических (2) прогнозов Т 2м на 1 неделю (а), месяц 1 (б) и месяц 2 (в) по данным на станциях североевразийского региона за 2002-2011 гг.

На рис. 4 показаны эмпирические функции распределения ошибок, построенные по тем же прогнозам за два испытательных периода: 2002–2011 и 2012–2017 гг. Распределения ошибок методических прогнозов по данным обеих выборок практически совпадают. От распределения ошибок климатических прогнозов они отличаются отсутствием смещения и более крутым перегибом. Что касается ошибок климатических прогнозов, то в пятилетие 2012–2017 гг. смещение их распределения заметно увеличилось.

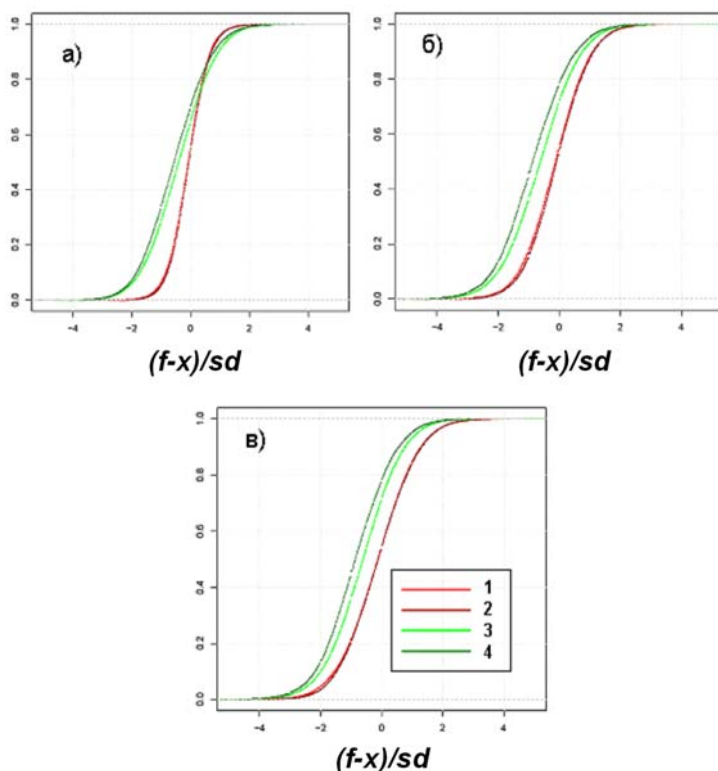


Рис. 4. Эмпирические функции распределения ошибок методических (1, 2) и климатических (3, 4) прогнозов Т2м на 1-ю неделю (а); месяц 1 (б); месяц 2 (в) по данным на станциях Северо-Евразийского региона за 2002–2011 (1, 3) и 2012–2017 гг. (2, 4).

В процессе испытаний осуществлялся также традиционный мониторинг качества прогнозов величины аномалии для каждого выпуска по критериям ME , $RMSE$, Q , AC , RO , которые рассчитывались по заданной пространственной области. Для каждого выпуска прогноза параллельно оценивались ошибки климатических прогнозов по соответствующим нормам эталонного климата (MEc , $RMSEc$, Qc). Прогнозы по Северо-Евразийскому региону оценивались и по данным на станциях, и по сеточным значениям*. Полученные средние за 2012–2017 гг. оценки по всем критериям представлены в табл. 1.

Данные табл. 1 показывают, что по критериям ME , $RMSE$, Q , AC оценки методических прогнозов, рассчитанные по станциям и по сетке, различаются мало. Различие соответствующих оценок климатического

* При обобщении по территории в сеточные данные вводились веса, пропорциональные косинусу широты, данные станций обобщались с равными весами.

прогноза весьма значительно. Климатические прогнозы на основе эталонного климата 1981–2010 гг., использованного для сеточных данных, имеют существенно лучшие оценки, чем оценки прогнозов по климату 1961–1990 гг., использованному для сети станций. Эта разница нашла также отражение в различии оценок методических прогнозов по ρ .

Таблица 1. Оценки прогнозов аномалий температуры воздуха на территории Северной Евразии (2012–2017 гг.)

| Период прогноза | ME/MEc , °C | $RMSE/RMSEc$, °C | Q/Qc | AC | ρ |
|---|---------------|-------------------|-----------|------|--------|
| По данным 70 станций (эталонный климат 1961–1990 гг.) | | | | | |
| 1 неделя | -0,13/-1,70 | 2,06/3,95 | 0,38/1,38 | 0,77 | 0,67 |
| 2 неделя | -0,12/-1,77 | 3,18/3,95 | 0,89/1,38 | 0,39 | 0,44 |
| 3 неделя | -0,15/-1,70 | 3,55/3,95 | 1,08/1,38 | 0,19 | 0,37 |
| 4 неделя | -0,15/-1,69 | 3,66/3,94 | 1,14/1,37 | 0,13 | 0,33 |
| Месяц 1 | -0,15/-1,71 | 2,01/2,88 | 0,89/1,95 | 0,46 | 0,59 |
| Месяц 2 | -0,23/-1,70 | 2,36/2,87 | 1,20/1,94 | 0,23 | 0,51 |
| По данным в узлах сетки 2,5°×2,5°(эталонный климат 1981–2010 гг.) | | | | | |
| 1 неделя | -0,22/-0,78 | 2,01/3,36 | 0,42/1,11 | 0,75 | 0,60 |
| 2 неделя | -0,11/-0,79 | 2,95/3,36 | 0,87/1,11 | 0,39 | 0,34 |
| 3 неделя | -0,07/-0,78 | 3,27/3,36 | 1,05/1,10 | 0,19 | 0,22 |
| 4 неделя | -0,11/-0,78 | 3,36/3,35 | 1,11/1,10 | 0,10 | 0,17 |
| Месяц 1 | -0,13/-0,78 | 1,89/2,30 | 0,82/1,17 | 0,46 | 0,43 |
| Месяц 2 | -0,17/-0,78 | 2,19/2,30 | 1,09/1,16 | 0,19 | 0,27 |

Сравнение методических и климатических прогнозов показывает, что информация методических прогнозов T2m для всех периодов прогноза существенно точнее, чем ориентация на нормы 1961–1990 гг. (данные станций). Оценки успешности относительно климата 1980–2010 гг. (сеточные данные) также свидетельствуют о статистически значимом** преимуществе методических прогнозов, за исключением оценок по $RMSE$ и Q на 4-ю неделю.

Потенциального потребителя, постоянно пребывающего в одном и том же месте, больше интересуют оценки прогнозов по временным рядам в конкретной точке. Однако для получения статистически надежных результатов локальных оценок успешности требуется использование многолетних рядов прогнозов. Опыт показал, что географическое распределение оценок по результатам 5 или 10-летних рядов, даже в годовом осреднении, меняется от периода к периоду. Так, коэффициенты пространственной корреляции между оценками AC или Q по 70 станциям за 2002–2011 и 2012–2017 гг. составляют $\sim 0,3$. Поэтому имело смысл

** Статистическая значимость различий оценивалась посредством парного двухвыборочного t -критерия

обобщение оценок за весь имеющийся ряд, включая исторические прогнозы с 1982 года. Географическое распределение оценок Q и AC , полученных на станциях в месячных прогнозах с нулевой заблаговременностью в среднем за период 1982–2017 гг., показано на рис. 5. Видно, что на большей части территории ошибки Q меньше 0,9, а коэффициенты корреляции больше 0,5. Относительно худшим качеством обладают прогнозы на северной и южной периферии рассмотренного региона и на Дальнем Востоке.

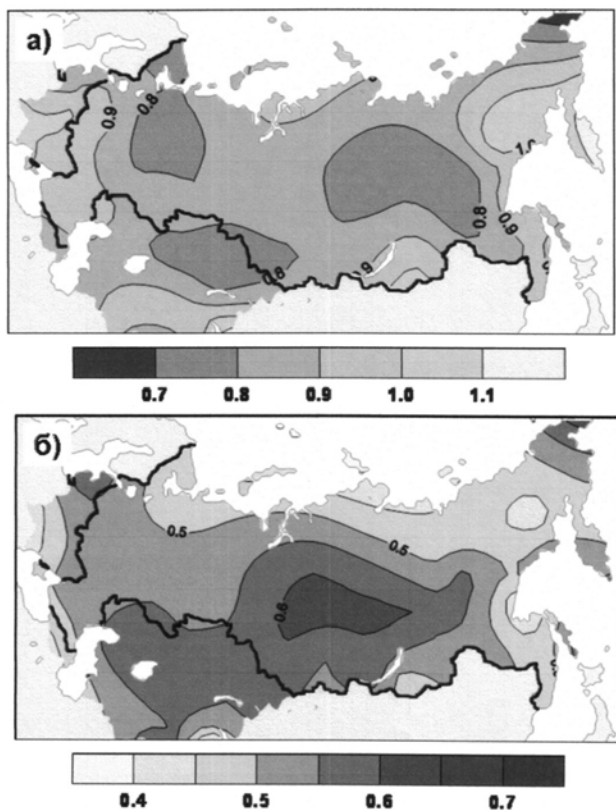


Рис. 5. Карты-схемы географического распределения оценок успешности прогнозов Т2м в среднем за 1982–2017 гг. по критериям Q (а) и AC (б).

Успешность вероятностных прогнозов.

Многоаспектная оценка качества вероятностных прогнозов предполагает анализ точности или надежности оценки вероятностей, разрешающей способности и категоричности прогнозов, способность прогностической системы к разделению (дискриминации) явлений при разном уровне пороговой вероятности и др.

Способность прогностической системы к дискриминации событий оценивается критерием *ROC* (relative operating characteristic) [16]. Этот критерий характеризует соотношение доли предсказанных явлений (h) и ложных тревог (f) при разных уровнях пороговой вероятности разделения событий для принятия решений. При анализе *ROC* для вероятностных прогнозов рассматриваются кривые изменения h и f по мере уменьшения пороговой вероятности. На рис. 6 приведены примеры кривых *ROC*, построенные по сеточным прогнозам приземной температуры воздуха и осадков в Северо-Евразийском регионе за 2012–2017 гг. Если $h > f$, точки кривой лежат выше главной диагонали и интегральный критерий *AROC*, равный площади под кривой, больше 0,5 (уровень климатического прогноза).

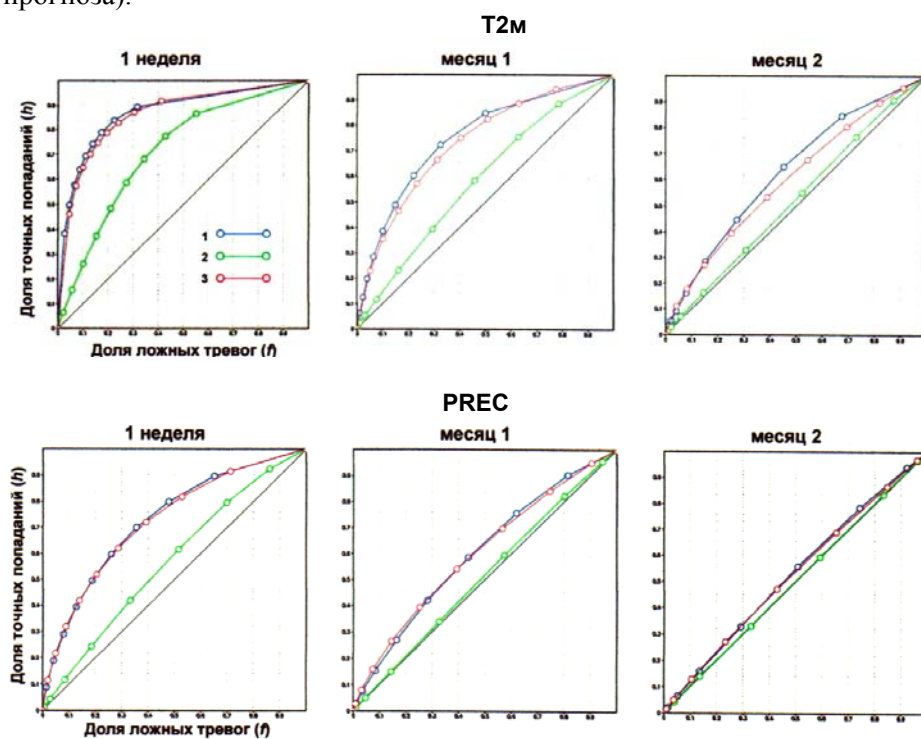


Рис. 6. Кривые *ROC* вероятностных прогнозов трех градаций аномалий T2M и PREC, построенные по результатам сеточных прогнозов для Северо-Евразийского региона за 2012–2017 гг. Градации: 1 – «ниже нормы», 2 – «норма», 3 – «выше нормы».

Результаты расчетов критерия *AROC* вероятностных прогнозов приземной температуры воздуха и осадков по Северо-Евразийскому региону за 2012–2017 гг. для всех шести периодов представлены в табл. 2. Для каждой градации представлены два столбца оценок: по сеточным прогнозам (1) и оценки по 70 станциям (2). Сравнение показывает, что

результаты этих оценок очень хорошо согласуются между собой. Общий вывод, который можно сделать по тем и другим данным, состоит в том, что вероятностные прогнозы по температуре воздуха для всех периодов прогноза имели оценки *AROC*, существенно превосходящие 0,5 (уровень климатического прогноза). Прогнозы осадков были относительно успешными 1, 2 недели и месяц с нулевой заблаговременностью, особенно в части прогнозов градаций «выше/ниже нормы». Таким образом, несмотря на весьма неудачные прогнозы аномалий количества осадков в непрерывной шкале, вероятностные прогнозы осадков содержат незначительную долю полезной информации.

Таблица 2. Успешность вероятностных прогнозов приземной температуры воздуха и осадков на территории Северной Евразии за 2012–2017 гг. по критерию *AROC*

| Период прогноза | Ниже нормы | | Норма | | Выше нормы | |
|--------------------------------------|------------|-------|-------|-------|------------|-------|
| | (1) | (2) | (1) | (2) | (1) | (2) |
| Приземная температура воздуха | | | | | | |
| 1 неделя | 0,867 | 0,904 | 0,712 | 0,769 | 0,859 | 0,893 |
| 2 неделя | 0,713 | 0,728 | 0,570 | 0,598 | 0,711 | 0,714 |
| 3 неделя | 0,626 | 0,625 | 0,534 | 0,540 | 0,615 | 0,610 |
| 4 неделя | 0,580 | 0,578 | 0,517 | 0,525 | 0,574 | 0,568 |
| Месяц 1 | 0,750 | 0,777 | 0,584 | 0,642 | 0,732 | 0,752 |
| Месяц 2 | 0,631 | 0,621 | 0,522 | 0,565 | 0,602 | 0,617 |
| Осадки | | | | | | |
| 1 неделя | 0,726 | 0,721 | 0,567 | 0,555 | 0,721 | 0,710 |
| 2 неделя | 0,569 | 0,570 | 0,506 | 0,509 | 0,571 | 0,563 |
| 3 неделя | 0,524 | 0,514 | 0,502 | 0,506 | 0,527 | 0,521 |
| 4 неделя | 0,507 | 0,512 | 0,499 | 0,500 | 0,517 | 0,507 |
| Месяц 1 | 0,602 | 0,589 | 0,513 | 0,512 | 0,602 | 0,578 |
| Месяц 2 | 0,532 | 0,516 | 0,499 | 0,500 | 0,527 | 0,515 |

Примечание: (1) – оценки по сеточным данным; (2) – оценки по станциям.

Наглядным способом анализа надежности, разрешения и категоричности прогнозов является рассмотрение диаграмм достоверности, совмещенных с гистограммами повторяемости прогностических вероятностей. На рис. 7 представлен пример диаграммы, построенной по результатам оперативных вероятностных прогнозов T2м для Северо-Евразийского региона (сеточные данные) на месяц с нулевой заблаговременностью. Графики показывают, насколько фактическая частота, рассчитанная по группе прогнозов в заданном интервале вероятностей, соответствовала прогнозу. Синие, зеленые и красные линии соответствуют прогнозам градаций: «ниже нормы», «норма» и «выше нормы» соответственно. Столбчатые гистограммы, изображенные на врезках синим, зеленым и красным цветом, показывают относительные частоты прогнозов каждой градации, соответствующих заданному интервалу вероятностей.

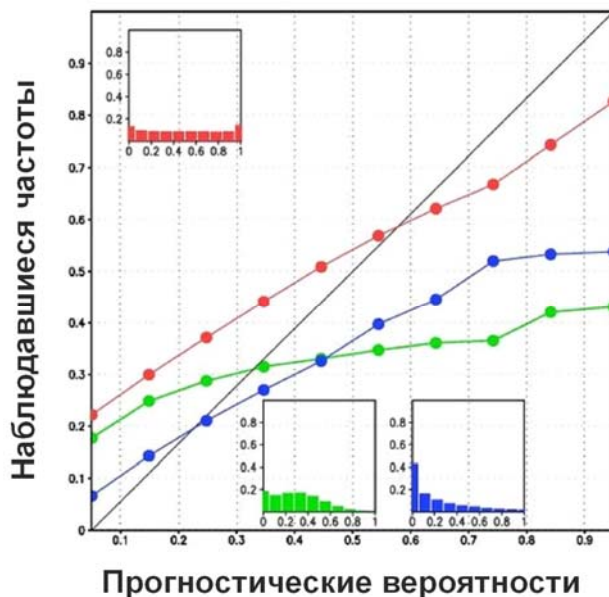


Рис. 7. Диаграммы достоверности вероятностных прогнозов трех градаций аномалий T2м, построенные по результатам сеточных прогнозов на месяц с нулевой заблаговременностью за 2012–2017 гг. для Северо-Евразийского региона. Синие линии – прогнозы градации «ниже нормы»; зеленые линии – «норма»; красные – «выше нормы».

Рис. 7 показывает, что в группах, прогнозирующих крайние градации выше/ниже нормы, имеется хорошо выраженная корреляция между прогностической вероятностью и фактической частотой события. Тем не менее при малых прогностических вероятностях фактические частоты превышали уровень прогностической вероятности, а в группах прогнозов, данных с большой вероятностью, оказывались заметно меньше. Для прогнозов градации норма связь прогностических и фактических частот выражена слабо.

Видно также, что фактические частоты осуществления градации «выше нормы» во всех группах прогнозов превышали фактические частоты градации «ниже нормы». Эта особенность связана с потеплением климата, вследствие которого повторяемость положительных аномалий по выборке 2012–2017 гг. более чем вдвое превышала повторяемость градации «ниже нормы».

Гистограммы относительных частот прогнозов в заданном интервале вероятностей показывают, что градации «ниже нормы» и «норма», в отличие от градации «выше нормы», прогнозировались с большой вероятностью крайне редко. Повторяемость прогнозов, в которых с большой вероятностью прогнозировалась градация «выше нормы», была относительно высокой, что вполне соответствует наблюдаемой тенденции изменения климата.

Заключение

В заключение отметим, что изложенная технология позволяет расширить спектр прогностической продукции традиционного месячного прогноза. Увеличение заблаговременности месячных прогнозов до двух недель, временная и пространственная детализация, прогнозирование в терминах вероятностей, а также режим еженедельного выпуска прогнозов – все это должно способствовать более активному использованию прогностической информации, которая, несмотря на высокую степень неопределенности, существенно дополняет и по ряду позиций уточняет климатические данные.

В соответствии с решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета прогнозы, выпускаемые в ГГО по рассмотренной технологии, рекомендованы к использованию в информационном обеспечении СЕАКЦ.

Следует отметить, что перспективы улучшения долгосрочных прогнозов далеко не исчерпаны. Главными направлениями на этом пути остаются совершенствование гидродинамических моделей атмосферы, океана, и климатической системы, а также увеличение полноты и точности вводимых начальных данных. Ввиду сложности этих задач быстрых успехов здесь ожидать не следует. Другой важной задачей остается адекватная оценка неопределенности конкретных прогнозов, учитывающая комплекс факторов: ошибки начальных данных, граничных условий, а также ошибки моделей, в частности ошибки параметризации подсеточных физических процессов. Эта задача должна решаться на основе использования мультимодельных ансамблей – ансамблей прогнозов нескольких качественных моделей, использующих различные схемы параметризации.

В целях создания мультимодельной прогностической системы на основе двух независимых моделей атмосферы: Т63L25 (ФГБУ «ГГО») и модели ПЛАВ (ФГБУ «Гидрометцентр России») [14] были проведены годичные совместные испытания детализированных прогнозов на срок до 45 суток с недельной дискретностью выпуска по согласованной программе. По полученным результатам в большинстве случаев и в среднем прогнозы ГГО имели более высокие оценки успешности, особенно в части прогнозов приземной температуры воздуха. Несмотря на это в ряде случаев комплексирование прогнозов ГГО и ГМЦ было весьма полезным. В среднем комплексные прогнозы характеризуются более устойчивыми во времени показателями успешности и также рекомендованы к использованию в информационном обеспечении СЕАКЦ.

Поступила в редакцию 21.09.2017 г.

Список использованных источников

1. *Багров А.Н., Локтионова Е.А.* Новая технология подготовки исходной информации для долгосрочного прогноза погоды // *Метеорология и гидрология*. 1994. № 11. С. 100-109.
2. *Вильфанд Р.М., Мартазинова В.Ф., Цепелев В.Ю., Хан В.М., Мироничева Н.П., Елисеев Г.В., Иванова Е.К., Тищенко В.А., Уткузова Д.Н.* Комплексирование синоптико-статистических и гидродинамических прогнозов температуры воздуха на месяц // *Метеорология и гидрология*. 2017. № 8. С. 5-17.
3. *Киктев Д.Б., Толстых М.А., Зарипов Р.Б., Зайченко М.Ю., Муравьев А.В., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Мирвис В.М., Мелешко В.П., Матюгин В.А., Львова Т.Ю.* Совместные испытания технологий глобального сезонного прогноза на основе моделей Гидрометцентра России и ГГО // *Информационный сборник № 38. Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов*. 2011. С. 4-13.
4. *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.
5. *Методические указания по проведению производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиофизических прогнозов*. РД 52.27.284-91. М.: Комитет гидрометеорологии при кабинете министров СССР, 1991. 150 с.
6. *Меццерская А.В., Мирвис В.М., Голод М.П.* Оценки успешности оперативных прогнозов, составленных методом многофакторной регрессионной средней и гидродинамико-статистическим методом для основной зернопроизводящей зоны СНГ и территории России. // *Проблемы и достижения долгосрочного метеорологического прогнозирования: Труды научного семинара Национальной академии наук Украины и российского фонда фундаментальных исследований 5-7 октября 2011, Киев, Украина*. Киев: Ника-Центр, 2012. С. 24-39.
7. *Мирвис В.М.* Оценка и коррекция систематических ошибок гидродинамического прогноза приземной температуры воздуха на месяц для сети станций СНГ // *Труды ГГО*. 2001. Вып. 550. С. 155-165.
8. *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.
9. *Мирвис В.М., Мелешко В.П., Гаврилина В.М., Матюгие В.А., Львова Т.Ю.* Прогноз метеорологических величин на предстоящий месяц гидродинамико-статистическим методом ГГО. II. Вероятностный прогноз: анализ и интерпретация распределения ансамбля, методика и качество прогнозов // *Метеорология и гидрология*. 2006. № 2. С. 5-16.
10. *Мирвис В.М., Мелешко В.П., Львова Т.Ю., Матюгин В.А.* Опыт калибровки вероятностных прогнозов приземной температуры воздуха, полученных на основе ансамблевых расчетов по гидродинамической модели атмосферы ГГО // *Труды ГГО*. 2012. Вып. 566. С. 1-19.
11. *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.
12. *Муравьев А.В.* Стандартизованная система верификации долгосрочных метеорологических прогнозов. (SVS LRF) // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада, Лтд, 2010. С.264-288.
13. *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.
14. *Толстых М.А.* Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды. М.; Обнинск: ОАО ФОП, 2010. 111 с.
15. *Шнееров Б.Е., Мелешко В.П., Матюгин В.А., Спорышев П.А., Павлова Т.В., Вавулин С.В., Школьник И.М., Зубов В.А., Гаврилина В.М., Говоркова В.А.* Современная версия глобальной модели общей циркуляции атмосферы ГГО (версия MGO-2) // *Труды ГГО*. 2001. Вып. 550. С. 3-43.

16. Jolliffe I., Stephenson D. Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science. Wiley and Sons Ltd, 2003. 240 p.
17. 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.
18. Min Y.M., Kryjov V.N., Oh, S.M., Lee H.J. Skill of real-time operational forecasts with the APCC multimodel ensemble prediction system during the period 2008–2015 // Clim. Dyn. 2017. doi:10.1007/s00382-017-3576-2.
19. 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. ORNL/CDIAC, Numerical data package – 040. Oak Ridge National laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA, 1993. 47 p. plus two appendices.
20. 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.
21. Standardized Verification System (SVS) for Long-Range Forecasts (LRF) // New Attachment II-9 to the Manual on the GDPS (WMO-No. 485), 2002. Vol. 1.
22. Taylor K.E.: Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram // J. Geophys. Res. 2001. Vol. 106. P. 7183-7192.
23. Vitart F., Robertson A.W., David L.T., Anderson D.L.T. Subseasonal to Seasonal Prediction Project: bridging the gap between weather and climate // Bulletin WMO. 2012. Vol. 61(2).

SUMMARIES

Five years experience of operational forecasting meteorological conditions for up to 45 days based on the atmosphere general circulation model of the MGO (version MGO-3 T63L25) / Mirvis V.M., Meleshko V.P., Lvova T.Yu., Matyugin V.A. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. 2017. Vol. 366. P. 29-50.

The article analyzes in detail the long time experience of the MGO in forecasting the average weekly and monthly meteorological conditions on the basis of the AGCM T63L25 for up to 45 days. The technology of weekly release of forecasts for two month periods (daily and with two weeks lead time) with detalization by weeks for the first month is described The forecast package contains anomalies in the continuous scale and probabilities of 3 categories on the global grid for the five main meteorological elements, as well as forecasts of surface air temperature and precipitation for 70 stations in the North-Eurasian region. Global and regional skills scores of forecast quality are considered.

Keywords: detailed monthly meteorological forecast, atmospheric general circulation model, probabilistic forecast, global and regional forecast skill scores.