

ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ ДЕТЕРМИНИСТСКИХ ПРОГНОЗОВ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ОСАДКОВ ПО МОДЕЛИ ПЛАВ ДЛЯ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА

В.А. Тищенко, В.М. Хан, Е.Н. Круглова, И.А. Куликова

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации
tischenko@mecom.ru, khan@mecom.ru*

Введение

По результатам современных оценок наблюдаемых и ожидаемых изменений климата Арктики единогласно отмечено, что этот регион является на Земле одним из наиболее климатически уязвимых. В последние годы в мировом сообществе предпринято немало усилий по исследованию экологической системы Арктики на фоне меняющегося климата. В [5] представлен краткий обзор по инициативам этого направления как на международном, так и на национальном уровнях. Авторы отмечают, что аспект изучения климата Арктики, связанный с фундаментальной проблемой предсказуемости климатической изменчивости арктических процессов на временных масштабах от сезона до нескольких лет, является наиболее трудным. Комплексное взаимодействие многочисленных физических процессов (морской лед, радиационные процессы, атмосферный пограничный слой, особенности формирования облачности, гидрофизические факторы субарктических морей и Северного Ледовитого океана, процессы в стратосфере и т. д.) и их обратных связей делают Арктику чрезвычайно сложным объектом с точки зрения прогнозирования гидрометеорологических условий,

особенно на длительные сроки. В поддержку решения данной проблемы Всемирный метеорологический конгресс в 2011 году инициировал создание Глобальной интегрированной системы прогнозирования в полярных регионах (ГИППС). Развитие ГИППС неразрывно связано с проведением исследований, нацеленных на улучшение понимания происходящих физических процессов, их связей, оптимизацией полярной системы наблюдений, разработки схем ассимиляции данных, усовершенствования методов моделирования и ансамблевого прогнозирования в широком диапазоне временных масштабов, а также улучшения систем статистической обработки результатов гидродинамического моделирования.

Следуя поставленным задачам в ГИППС, в настоящей работе представлены результаты постобработки долгосрочных прогнозов на месяц-сезон для Арктического региона на основе ансамблей выходных данных полулагранжевой глобальной конечно-разностной модели общей циркуляции атмосферы ПЛАВ [14].

Для решения задач выпуска детерминистских и вероятностных сезонных метеорологических прогнозов в региональном масштабе был создан Северо-Евразийский региональный климатический центр (СЕАКЦ). В настоящее время в СЕАКЦ для составления данных прогнозов используются модели Гидрометцентра России [14] и ГГО [8] (глобальные ансамблевые прогнозы с заблаговременностью до 4 месяцев). В [3] описана технологическая линия выпуска долгосрочных прогнозов СЕАКЦ применительно к Арктическому региону. Результаты прогнозирования – наборы полей метеорологических величин, из которых основное внимание уделяется полям приземной температуры и осадков.

Качество гидродинамических прогнозов по мере увеличения заблаговременности уменьшается. Это в первую очередь связано с ослаблением влияния начального состояния. При этом под влиянием долгоживущих аномалий состояния подстилающей поверхности могут формироваться крупномасштабные долговременные аномалии атмосферной циркуляции, устойчивые режимы циркуляции [7]. Для регионов Северная Евразия и Арктика наиболее существенными инерционными характеристиками являются температура поверхности океана в Северной Атлантике, морской лед,

ледяной и снежный покров суши, влажность почвы. Влияние этих факторов часто носит региональный характер, что отражается в структуре пространственного распределения оценок успешности прогнозов. В отдельных районах качество гидродинамических прогнозов на 1–2 месяца хорошее или удовлетворительное, для других территорий успешность прогнозов скромная. Оценки прогнозов на 3–4 месяца чаще всего близки к случайным. При расчете средних многолетних значений прогностических полей («модельный климат») и трендов выявляются некоторые особенности [6]. При сравнении с фактическим климатом интенсивность очагов повышенного и пониженного фона метеорологических величин имеет видимые отличия; кроме того, с увеличением заблаговременности прогноза отмечается расхождение очагов значительных трендов модельных данных от фактических. В связи с этим необходима процедура статистической коррекции и пространственной детализации сезонных прогнозов, что позволяет повысить качество прогнозов.

В данной статье приводятся результаты статистической коррекции прогнозов температуры и осадков на 1–4 месяца для территории Арктики.

Обработка выходных данных прогнозов температуры и осадков по модели ПЛАВ и данных реанализа

Начальными данными для модели ПЛАВ при расчете ретроспективных прогнозов являются поля на изобарических поверхностях реанализа NCEP/DOE [20]. Верификация также выполнялась по отношению к полям реанализа NCEP/DOE за соответствующий период. Разрабатываемая технология прогноза температуры воздуха и суммы осадков на месяц-сезон предусматривает использование ретроспективных ансамблевых полей гидродинамической модели ПЛАВ для вычисления «модельного климата» и проведения работ по оценке успешности качества прогнозов. Для верификации модельных прогнозов и вычисления модельного климата проведены расчеты на историческом материале за период 1981–2010 гг. В настоящее время один прогноз на историческом материале представляет собой 10 членов ансамбля, которые генерируются с

применением процедуры выращивания быстрорастущих возмущений. В оперативном режиме генерируются 20 членов ансамбля. Модель стартует в конце каждого месяца, прогноз дается на 4 месяца. В новых версиях модели поля имеют сеточное разрешение 1,5 градуса по широте и долготе (240×121 узел сетки).

Ведется постоянная работа по созданию новых версий данной модели. В связи с этим приводимые ниже оценки прогнозов не являются окончательными и будут меняться (надеемся, в лучшую сторону) в зависимости от усовершенствований модели.

Для проведения процедуры статистической интерпретации прогнозов температуры и осадков сформированы архивы полей реанализа и ретроспективных прогнозов. Созданы файлы полей и временных рядов среднесуточных и среднемесячных значений давления на уровне моря (SLP), геопотенциала (H500, H850), температуры на поверхности 850 гПа (T850), приземной температуры воздуха (T2м) и осадков (Prec) в регулярной географической сетке за период 1981–2010 гг. (годы расчета ретроспективных прогнозов).

Рассчитаны средние многолетние поля по прогностическим и фактическим данным за весь рассматриваемый период. Таким образом получены данные фактического и модельного климата. Модельный климат рассчитывался отдельно для каждого ряда четырехмесячных прогнозов.

В целом фактический и модельный климат имеют удовлетворительную согласованность. При этом можно отметить некоторые различия, растущие по мере увеличения заблаговременности. Интенсивность очагов повышенного и пониженного температурного фона имеет видимые отличия. В климатических модельных полях температуры и осадков отмечаются некоторые пространственные сдвиги районов таких очагов. С увеличением заблаговременности прогноза отмечается расхождение (чаще пространственное смещение) очагов положительных (отрицательных) трендов модельных данных от фактических. Подобные смещения характерны для большинства прогностических полей, в связи с чем необходима процедура статистической коррекции и даунскейлинга (пространственной детализации сезонных прогнозов) [7, 8, 11, 14–19].

Модельные прогнозы температуры воздуха имеют значимые положительные оценки для первого прогностического месяца и лишь в отдельных регионах при заблаговременности более месяца. Прогнозы осадков на долгие сроки имеют низкую успешность. Поэтому предлагается схема, в которой температура и осадки восстанавливаются по прогностическим полям H500, T850, SLP, а также по самим значениям температуры и осадков, сдвинутых в пространстве относительно искомой точки.

Поскольку дисперсии полей предиктантов и предикторов различаются, исходные поля подвергаются нормированию, а затем восстанавливаются, что делает прогнозируемую изменчивость более реалистичной. Исходные прогностические данные $dX_0(x, y)$ предварительно корректируются по среднему квадратическому отклонению:

$$dX(x, y) = \left(\frac{\sigma_F(x, y)}{\sigma_R(x, y)} \right) \cdot dX_0(x, y), \quad (1)$$

где σ_F – СКО прогностических рядов; σ_R – рядов реанализа.

Существует ряд методов статистической коррекции долгосрочных гидродинамических прогнозов, представленных, например, в [4, 7, 8, 11, 14–19]. В последние годы в качестве статистического инструмента для долгосрочного прогнозирования применяются нейронные сети. Широко применяются в задачах долгосрочного метеорологического прогнозирования модели статистической коррекции, построенные на основе метода канонических корреляций, например, [2, 16] Метод позволяет определить пары полей, временная эволюция которых оптимально коррелирована. В [16] было показано, что методы множественной регрессии и дискриминантного анализа являются частными случаями метода канонических корреляций. В предлагаемой работе применен метод множественной регрессии на главных компонентах.

Ранее авторами [12] рассматривалась схема прогноза температуры и осадков по аналогии с методами, представленными в [17, 19]. Для отбора оптимальных предикторов использовался регрессионный метод. Значения коэффициентов корреляции ACC, значимых на 5%-ном уровне (в зависимости от эффективного числа

степеней свободы эти значения очень незначительно колеблются около 0,37) [4] в скользящем окне размером около 1000×1000 км, служили пороговыми фильтрами при просеивании предикторов. Рассчитывались средние прогностические значения в таких окнах и сравнивались с фактическими полями температуры и осадков с различным пространственным смещением скользящего окна относительно искомого узла сетки. Затем проводилась процедура кроссвалидации (скользящего контроля). Из выборки удалялись три случая, на остальных решались уравнения множественной регрессии, предикторами в которых являлись величины с пространственным смещением к районам, где отмечены наибольшие по величине корреляции между $T2m(x_0, y_0)$ и $T2m(x_{max}, y_{max})$, $T2m(x_0, y_0)$ и $H500(x_{max}, y_{max})$, $T2m(x_0, y_0)$ и $T850(x_{max}, y_{max})$, а также аналогичные корреляции для осадков (исходные узлы сетки обозначены, как x_0, y_0 , а узлы сетки, где отмечены максимальные значения ACC , как x_{max}, y_{max}). При таком подходе, несмотря на заметное улучшение среднего качества скорректированных прогнозов, наблюдалась некоторая «мозаичность» искомым полей, что может говорить о случайности полученных результатов в некоторых районах. В целях сглаживания полей проводилось осреднение по значительной территории, что может быть полезно, например, для прогнозов по районам водосбора крупных рек (водохранилищ), но не информативно для конкретной точки.

В настоящей работе предложена схема с предварительным разложением нормированных рядов исходных прогнозов по ЭОФ [1]. Нормирование позволило использовать в одной выборке различные поля ($H500, T850, SLP, Prec, T2m$).

Поиск наилучших предикторов после предварительных расчетов, как и в [12], проводился в режиме кроссвалидации. Для большей устойчивости в дальнейшем предполагается использовать схему с «внутренним» кроссвалидационным циклом [7], однако ввиду очень большого объема вычислений для такой обширной территории, как Арктика, данная схема пока не может быть реализована в оперативном режиме.

В режиме кроссвалидации проводился поиск наилучших (с точки зрения качества прогнозов) комбинаций коэффициентов

разложения предикторов. При этом исключались члены с маленькими значениями собственных чисел. Из оставшихся коэффициентов разложения по результатам решения уравнений множественной линейной регрессии отбирались 2–4, использование которых в уравнениях регрессии в среднем за исследуемый период дало наилучшие показатели оправдываемости.

Во всех случаях улучшение качества при использовании более четырех предикторов статистически не значимо и приводило к увеличению неопределенности прогноза.

Оценки качества детерминистских долгосрочных прогнозов погоды

В работе применялись показатели качества прогнозов, рекомендованные в [9, 10].

Обозначим x_{ij} и f_{ij} ($i = 1, \dots, n$) временные ряды соответственно наблюдений и детерминистических прогнозов для узла сетки j . Фактический и модельный климат обозначим как \bar{x}_j и \bar{f}_j , средние квадратические отклонения (СКО) s_{xj} и s_{fj} .

Тогда СКО прогнозов имеет вид:

$$MSE_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_{ij} - x_{ij})^2. \quad (2)$$

Согласно [10] СКО прогнозов «климатологии» выражается следующим образом:

$$MSE_{cj} = \frac{n-1}{n} s_{xj}^2.$$

Тогда показатель качества $MSSS$ для j определяется как

$$MSSS_j = 1 - \frac{MSE_j}{MSE_{cj}}. \quad (3)$$

Общий показатель $MSSS$ рассчитывается следующим образом:

$$MSSS = 1 - \frac{\sum_j w_j MSE_j}{\sum_j w_j MSE_{cj}}, \quad (4)$$

где w_j равно $\cos(\theta_j)$, где θ_j — широта в узле сетки j .

Аналог показателя СОХ (сравнительная оперативная характеристика) для детерминированных прогнозов рассчитывается так. Используется общая таблица сопряженности признаков СОХ, в которой рассчитаны O_1 — число правильных прогнозов; NO_1 — ложные тревоги; O_2 — несовпадения прогнозов; NO_2 — правильные исключения событий. Для проверки на сетке при расчете этих показателей используются весовые коэффициенты w_j .

Рассчитываются коэффициент совпадений:

$$HR = \frac{O_1}{O_1 + O_2},$$

коэффициент ложных тревог (FAR):

$$FAR = \frac{NO_1}{NO_1 + NO_2}.$$

Значения HR и FAR находятся в пределах от 0 до 1. HR , равный 1, означает, что все случаи наличия конкретного события были правильно спрогнозированы. Для FAR желательным является значение 0.

Для детерминистических прогнозов рассчитывается показатель Ханссена и Кипера:

$$KS = HR - FAR.$$

KS может быть пересчитан таким образом, что возможные значения будут находиться в пределах от 0 до 1 (1 соответствует совершенным прогнозам):

$$KS_{scaled} = \frac{KS + 1}{2}. \quad (5)$$

Тогда пересчитанный показатель KS становится сопоставимым с площадью под кривой СОХ для вероятностных прогнозов (площадь, равная 1 для совершенных прогнозов, 0,5 для прогнозов с отсутствием информации).

Также рассчитываются коэффициенты корреляции аномалий прогнозов и данных наблюдений в узлах сетки (ACC) и показатели совпадения по знаку (ρ).

Результаты статистической коррекции прогнозов ПЛАВ для района 60–80° с. ш.

Процедура статистической коррекции, описанная выше, применялась к прогнозам приземной температуры и месячных сумм осадков на 1–4 месяца по модели ПЛАВ для территории севернее 60° с. ш. Район, окружающий полюс (севернее 80° с. ш.) не рассматривался в связи с малым покрытием территории наблюдения и, следовательно, невысоким качеством данных реанализа.

Значения ретроспективных прогнозов ПЛАВ представлялись в виде среднего по 10 членам ансамбля в каждой точке сетки. В этих же точках рассматривались скорректированные прогнозы и значения полей реанализа. В данном исследовании представлены результаты расчетов для прогнозов на май-август. Были рассчитаны осредненные значения приземной температуры воздуха и кумулятивные значения осадков.

На рис. 1 и 2 представлены карты полей оценок прогнозов температуры и осадков на историческом материале. На картах приведены *ACC* исходных и скорректированных прогнозов. Видно, что для всех месяцев и для любой точки среднее качество прогнозов после статистической коррекции улучшается.

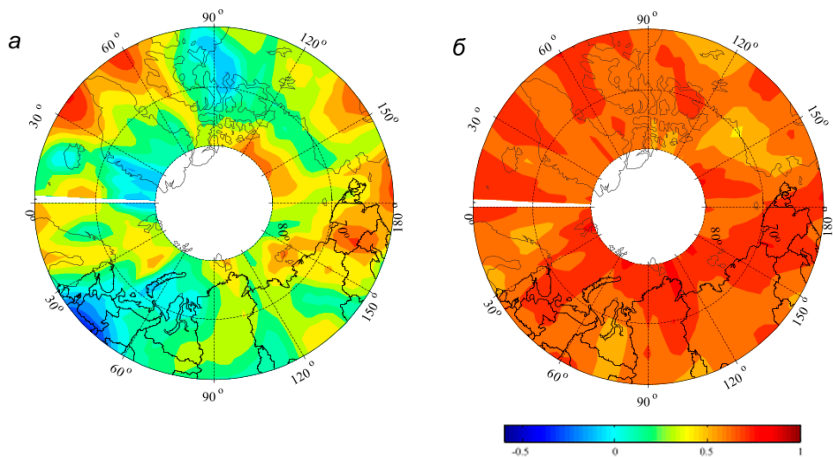


Рис. 1. Карты полей *ACC* прогнозов температуры на историческом материале: а) исходные, б) скорректированные прогнозы.

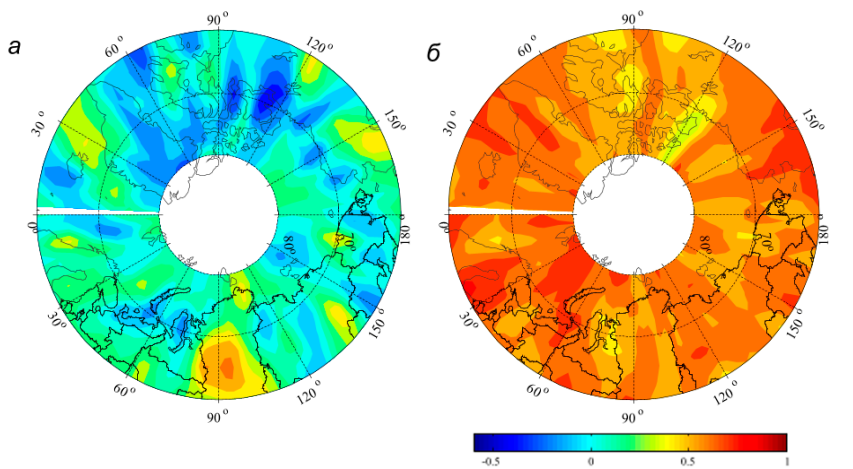


Рис. 2. Карты полей ACC прогнозов осадков на историческом материале: а) исходные, б) скорректированные прогнозы.

Для любой точки скорректированные прогнозы дают значимые корреляции. При этом превышение ACC скорректированных прогнозов над исходными не всегда значимо, в первую очередь над районами с высокой оправдываемостью модельного прогноза. Для этих районов предполагается использовать исходные прогнозы.

Для примера на рис. 3 приведен пример прогноза аномалии средней месячной температуры воздуха над исследуемым районом (исходный ΔT_0 и скорректированный ΔT_k) на май 2010 года, а также фактическое поле аномалий по реанализу ΔT_r .

На рис. 4 в графическом виде представлен ход средних показателей качества ретроспективных прогнозов ΔT_0 и ΔT_k по территории Арктики, а также отдельно для района $0-90^\circ$ в. д. На рис. 5 – то же для месячных сумм осадков. Представлены коэффициенты корреляции аномалий (ACC) и средние квадратические отклонения прогнозов от реанализа (MSE), рассчитанные по площади районов (прогнозы на май и средние прогнозы на май-июль). Красным обозначены показатели качества прогнозов по модели, голубым – прогнозы со статистической коррекцией.

Оценки скорректированных прогнозов температуры воздуха и сумм осадков по всей территории 60–80° с. ш. выше оценок «сырых» прогнозов для всего периода 1981–2010 гг. Для прогнозов по району, ограниченному долготами 0–90° в. д., отмечены случаи, когда качество модельных прогнозов оказалось незначительно выше для температуры воздуха.

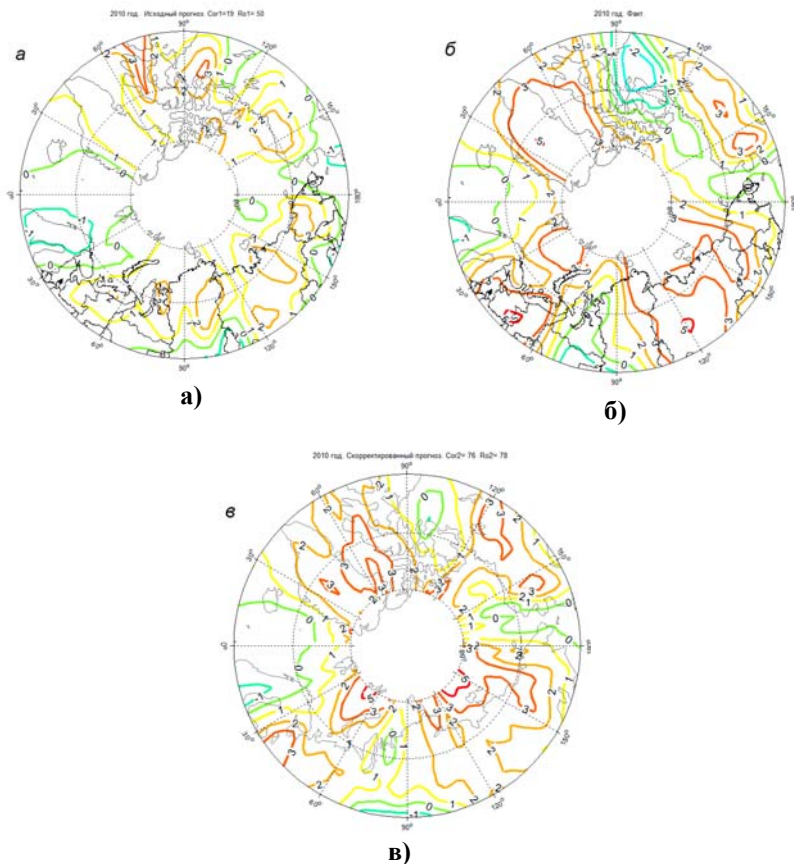
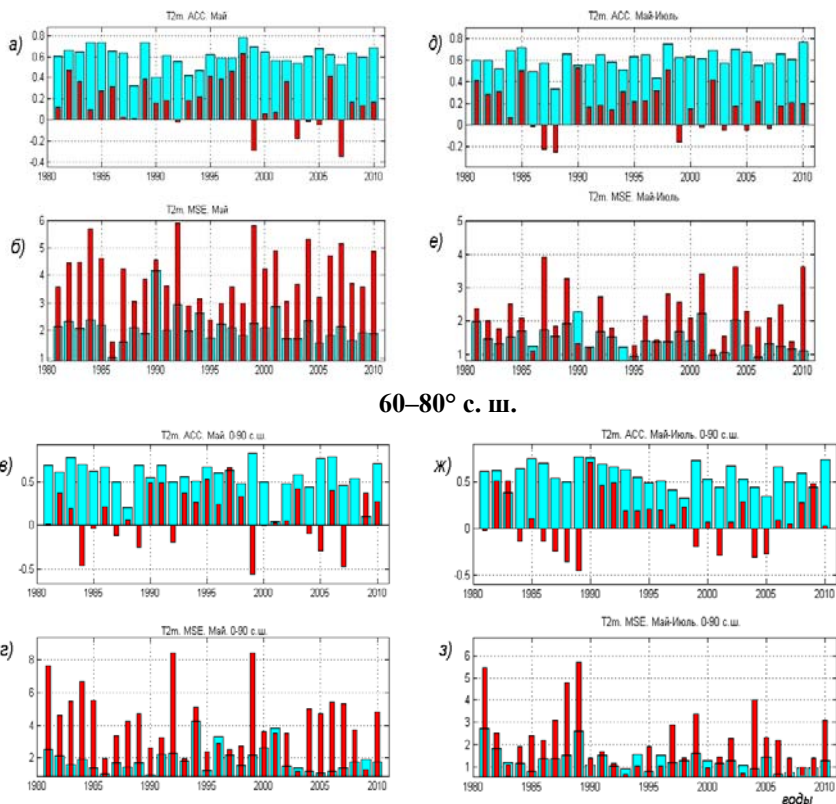


Рис. 3. Прогноз аномалии средней месячной температуры воздуха над исследуемым районом на май 2010 г. а) исходный прогноз, б) реанализ, в) скорректированный прогноз.



60–80° с. ш.

60–80° с. ш., 0–90° в. д.

Рис. 4. Коэффициенты корреляции (ACC) и MSE фактической и прогностической средней температуры воздуха, рассчитанные для каждого года по площади района 60–80° с. ш. (сверху),

60–80° с. ш., 0–90° в. д. (снизу):

- а) ACC (май); б) MSE (май);**
- в) ACC (май); г) MSE (май);**
- д) ACC (май-июль); е) MSE (май-июль);**
- ж) ACC (май-июль); з) MSE (май-июль).**

Красные столбики – модельный прогноз, синие столбики – прогноз с коррекцией.

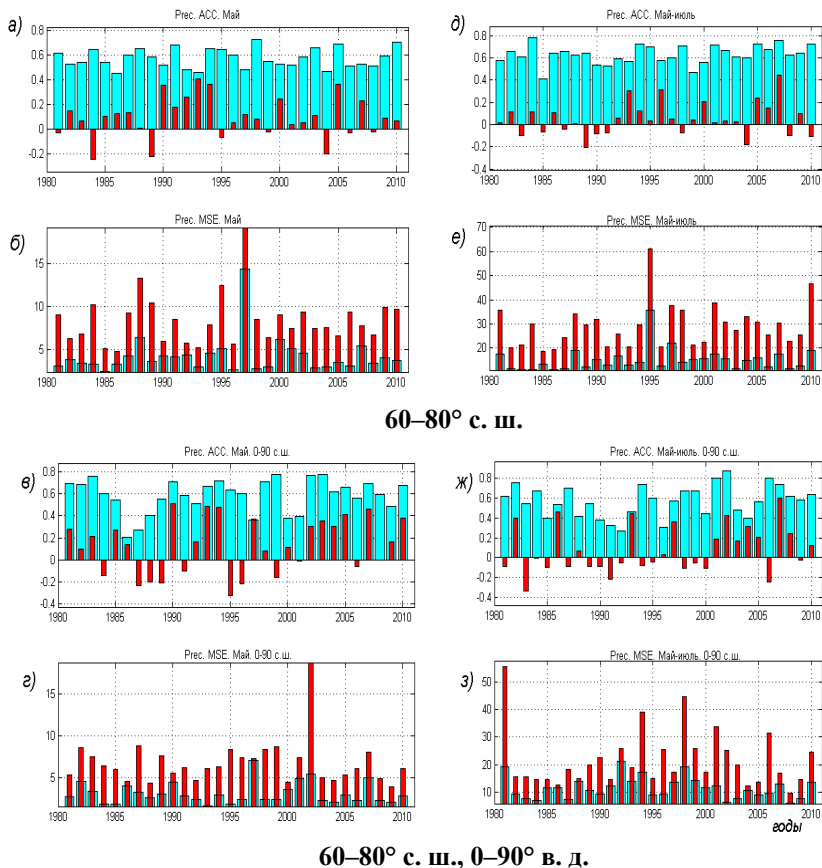


Рис. 5. Коэффициенты корреляции (*ACC*) и *MSE* фактических и прогностических осадков, рассчитанные для каждого года по площади района 60–80° с. ш. (сверху), 60–80° с. ш., 0–90° в. д. (снизу):

- а) *ACC* (май); б) *MSE* (май);
 в) *ACC* (май); г) *MSE* (май);
 д) *ACC* (май-июль); е) *MSE* (май-июль);
 ж) *ACC* (май-июль); з) *MSE* (май-июль).

Красные столбики – модельный прогноз, синие столбики – прогноз с коррекцией.

В табл. 1–4 приведены средние оценки качества прогнозов по всей территории и по району 0–90° в. д. $RMSE$ – корень квадратный из MSE ; $RMSS$ рассчитан согласно формуле:

$$RMSS = 1 - (1 - MSSS)^{1/2},$$

KS_{scaled} рассчитаны для градаций больше и меньше нормы по территории.

Во всех случаях показатели качества скорректированных прогнозов значимы и существенно выше, чем для исходных прогнозов.

Таблица 1

Оценки прогнозов на май-август аномалий средней месячной температуры по модели ПЛАВ (исходные и скорректированные) на май-август по территории 60–80° с. ш.

		Май	Июнь	Июль	Август
ACC	исходный	0,37	0,16	0,11	0,12
	коррекция	0,67	0,61	0,64	0,65
ρ	исходный	0,29	0,13	0,08	0,10
	коррекция	0,49	0,43	0,47	0,47
$RMSE$	исходный	1,91	1,44	1,21	1,34
	коррекция	1,39	1,13	0,91	0,96
$RMSSS$	исходный	0,01	0,02	0	0,03
	коррекция	0,29	0,23	0,25	0,27
KS_{scaled}	исходный	0,60	0,54	0,53	0,55
	коррекция	0,74	0,72	0,73	0,73

Видно, что качество прогнозов средней температуры на первый месяц без коррекции достаточно высокое, в последующие месяцы оценки заметно ухудшаются. Как было отмечено выше, одной из причин является пространственное смещение аномалий в термобарических полях модели. Учет данной особенности позволяет существенно повысить качество прогнозов даже на 4-й месяц. Следует отметить улучшение качества прогнозов по показателю $RMSSS$. Для модельных прогнозов температуры и осадков значения

RMSSS близки к случайным (для осадков – отрицательные). Для прогнозов с коррекцией все значения устойчиво положительные.

Таблица 2

Оценки прогнозов на май-август аномалий средней месячной температуры по модели ПЛАВ (исходные и скорректированные) на май-август по территории 60–80° с. ш., 0–90° в. д.

		Май	Июнь	Июль	Август
<i>ACC</i>	исходный	0,31	0,21	0,07	0,08
	коррекция	0,67	0,61	0,63	0,66
ρ	исходный	0,25	0,21	0,06	0,09
	коррекция	0,47	0,43	0,44	0,46
<i>RMSE</i>	исходный	1,95	1,45	1,25	1,31
	коррекция	1,30	1,15	0,93	0,99
<i>RMSSS</i>	исходный	0,02	0,04	0,02	0,01
	коррекция	0,28	0,23	0,25	0,24
<i>KS_{scaled}</i>	исходный	0,56	0,59	0,50	0,54
	коррекция	0,74	0,71	0,72	0,71

Таблица 3

Оценки прогнозов на май-август аномалий месячных сумм осадков по модели ПЛАВ (исходные и скорректированные) на май-август по территории 60–80° с. ш.

		Май	Июнь	Июль	Август
<i>ACC</i>	исходный	0,16	0,09	-0,01	-0,02
	коррекция	0,61	0,62	0,61	0,60
ρ	исходный	0,13	0,07	-0,02	-0,03
	коррекция	0,44	0,44	0,43	0,42
<i>RMSE</i>	исходный	0,33	0,39	0,48	0,49
	коррекция	0,22	0,27	0,33	0,35
<i>RMSSS</i>	исходный	-0,08	-0,09	-0,10	-0,12
	коррекция	0,22	0,24	0,26	0,23
<i>KS_{scaled}</i>	исходный	0,54	0,51	0,49	0,48
	коррекция	0,71	0,72	0,73	0,71

Таблица 4

Оценки прогнозов на май-август аномалий месячных сумм осадков по модели ПЛАВ (исходные и скорректированные) на май-август по территории 60–80° с. ш., 0–90° в. д.

		Май	Июнь	Июль	Август
<i>ACC</i>	исходный	0,18	0,08	0,03	-0,01
	коррекция	0,65	0,62	0,64	0,62
ρ	исходный	0,13	0,05	0,03	-0,01
	коррекция	0,47	0,45	0,47	0,45
<i>RMSE</i>	исходный	0,35	0,44	0,49	0,49
	коррекция	0,22	0,31	0,35	0,35
<i>RMSSS</i>	исходный	-0,14	-0,12	-0,08	-0,13
	коррекция	0,24	0,24	0,26	0,23
<i>KS_{scaled}</i>	исходный	0,50	0,51	0,51	0,48
	коррекция	0,73	0,72	0,73	0,72

Оценки качества скорректированных прогнозов с увеличением заблаговременности практически не изменяются, что может быть связано с учетом в процедуре статистической коррекции только внутренних свойств модельного прогноза.

Проведено сравнение данных реанализа и станционных наблюдений температуры и осадков. Для данных с суточным и недельным осреднением отмечено значимое на 5%-ном уровне расхождение значений. Для величин, осредненных за месяц, различия между станционными данными и данными реанализа не значимы.

Проверка качества прогнозов в сравнении с данными метеорологических станций вблизи побережья Арктических морей России не выявила значимых отличий от результатов, представленных в табл. 1–4. Однако возможны существенные отличия для акваторий морей, которые практически не охвачены наблюдательной сетью, а поля реанализа могут заметно отличаться от фактических значений метеорологических величин.

Выводы

Апробирован один из методов статистической коррекции ансамблевых полей гидродинамической модели ПЛАВ для территории 60–80° с. ш.

Предложена схема множественной линейной регрессии с предварительным разложением нормированных рядов исходных прогнозов по ЭОФ. В режиме кроссвалидации проведен поиск наилучших комбинаций предикторов.

Полученные оценки скорректированных ретроспективных прогнозов по модели ПЛАВ показали существенное улучшение качества прогнозов на историческом материале и возможность их использования для долгосрочного детерминистского прогноза. Для всей территории Арктики оценки скорректированных прогнозов температуры воздуха и сумм осадков выше оценок «сырых» прогнозов для всего периода 1981–2010 гг. Для прогнозов по району, ограниченному долготами 0–90° в. д., отмечены случаи, когда качество модельных прогнозов оказалось незначительно выше для температуры воздуха.

Следующим этапом исследований будет статистическая коррекция вероятностных прогнозов температуры воздуха и осадков с применением теоремы Байеса.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-37-00053) в Гидрометцентре России.

Список использованных источников

1. *Багров Н.А.* Аналитическое представление метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих // Труды ЦИП. – 1959. – Вып. 74. – С. 3–24.

2. *Багров Н.А.* О канонической корреляции векторов // Труды Гидрометцентра СССР. – 1980. – Вып. 226. – С. 3–9.

3. *Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Тищенко В.А., Хан В.М.* Выпуск долгосрочных метеорологических прогнозов по Арктическому региону в рамках деятельности Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) // Труды Гидрометцентра России. – 2016. – см. наст. сборник.

4. Бундель А.Ю., Р. М. Вильфанд, Крыжов В.Н., Тищенко В.А., Хан В.М. Оценка мультимодульного вероятностного прогноза на сезон на основе данных моделей АРСС // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 3. – С. 5–19.

5. Катцов В.М., Порфирьев Б.Н. Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // Арктика: экология и экономика. – 2012. – № 2(6). – С. 66–79.

6. Киктев Д.Б., Крыжов В.Н. О сравнении различных методов оценки статистической значимости линейных трендов // Метеорология и гидрология. – 2004. – № 11. – С. 27–38.

7. Крыжов В.Н. Постпроцессинг модельных долгосрочных прогнозов в Североевразийском климатическом центре // 80 лет Гидрометцентру России. – М.: Триада лтд, 2010. – С. 247–253.

8. Мирвис В.М., Мелешко В.П. Современное состояние и перспективы развития метеорологических прогнозов на месяц и сезон // Труды ГГО. – 2008. – Вып. 558. – С. 3–40.

9. Муравьев А.В., Вильфанд Р.М. О стандартизации оценок качества среднесрочных и долгосрочных прогнозов погоды // Метеорология и гидрология. – 2000. – № 12. – С. 24–34.

10. Наставление по Глобальной системе обработки данных и прогнозирования. Том I. Глобальные аспекты (Дополнение IV к Техническому регламенту ВМО) // ВМО-№ 485. – 2010.

11. Рубинштейн К.Г., Новикова И.Н. Испытание метода статистической детализации сезонного прогноза погоды для региона Москвы // Труды Гидрометцентра России. 2005. – Вып. 341. – С. 22–34.

12. Тищенко В.А., Хан В.М., Толстых М.А., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Гельфан А.Н. Применение статистической коррекции для детерминистских месячных и сезонных прогнозов температуры воздуха и осадков по модели ПЛАВ для отдельных районов России // Труды Гидрометцентра России. – 2015. – Вып. 358. – С. 121–132.

13. Толстых М.А., Киктев Д.Б., Зарипов Р.Б., Зайченко М.Ю., Шашкин В.В. Воспроизведение атмосферной циркуляции на сезонных масштабах новой версией полулагранжевой модели атмосферы // Известия РАН. ФАО. – 2010. – Т. 46, № 2. – С. 149–160.

14. Хан В.М., Р. М. Вильфанд, Бундель А.Ю., Крыжов В.Н., Мин Е.-М., Тищенко В.А. Мультимодельный подход при составлении прогнозов погоды на сезон // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 1. – С. 19–29.

15. Bretherton C., Smith C., Wallace J. An intercomparison of methods to find coupled patterns in climate data // J. Climate. – 1992. – Vol. 5. – P. 541–560.

16. *Glahn H.R.* Canonical correlation and its relationship to discriminant analysis and multiple regression // *J. Atmos. Sci.* – 1968. – Vol. 25, No. 1. – P. 23–31.

17. *Kryjov V.N.* Seasonal climate prediction for North Eurasia // *Environ. Res. Let.* – 2012. – Vol. 7. – P. 015203. – doi:10.1088/1748-9326/7/1/015203.

18. *Min Y.-M., Kryjov V.N., Oh J.-H.* Probabilistic interpretation of regression-based downscaled seasonal ensemble predictions with the estimation of uncertainty // *J. Geoph. Res.* – 2011. – Vol. 116. – P. D08101. – doi:10.1029/2010JD015284.

19. *Min Y.-M., Kryjov V.N., Park C.-K.* A probabilistic multimodel ensemble approach to seasonal prediction // *Weather and Forecasting.* – 2009. – Vol. 24. – P. 812–828.

20. *Kanamitsu M., Ebisuzaki W.I., Woollen J., Yang Shi-Keng, Hnilo J.J., Fiorino M., Potter G.L.* NCEP–DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* – 2002. – Vol. 83. – P. 1631–1643.

Поступила в редакцию 27.06.2016 г.