

ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ МЕСЯЧНЫХ И СЕЗОННЫХ ДЕТЕРМИНИСТСКИХ ПРОГНОЗОВ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ОСАДКОВ ПО МОДЕЛИ ПЛАВ ДЛЯ ОТДЕЛЬНЫХ РАЙОНОВ РОССИИ

*В.А. Тищенко¹, В.М. Хан¹, М.А. Толстых^{1,2}, Е.Н. Круглова¹,
И.А. Куликова¹, А.Н. Гельфан³*

*¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации*

²Институт вычислительной математики РАН

³Институт водных проблем РАН

tischenko@mecom.ru, khan@mecom.ru, tolstykh@mecom.ru

Введение

Несмотря на непрерывную деятельность по усовершенствованию гидродинамического прогнозирования на долгие сроки, в процессе интегрирования совместных гидродинамических моделей возникают систематические ошибки, которые неизбежно снижают уровень оправдываемости прогнозов. Это связано, во-первых, с тем, что качество и разрешение по пространству и времени наблюдательной гидрометеорологической сети, необходимой для задания начальных условий в моделях, являются не вполне удовлетворительными, а, во-вторых, понимание физических процессов, происходящих в климатической системе, все еще недостаточное, что заставляет описывать в моделях процессы взаимодействия окружающей среды в упрощенной форме. Кроме того, в связи с ограничениями вычислительных ресурсов, прогностические поля при долгосрочном прогнозировании часто имеют недостаточное разрешение. Статистическая постпроцессинговая процедура – один из

способов повышения предсказуемости, позволяющая провести необходимую корректировку гидродинамических прогнозов к конкретному региону с учетом его физико-географических особенностей.

В Гидрометцентре России технология выпуска глобальных ансамблевых прогнозов с заблаговременностью до четырех месяцев осуществляется на базе использования полулагранжевой глобальной конечно-разностной модели общей циркуляции атмосферы ПЛАВ [8, 9]. Ведется постоянная работа по созданию новых версий данной модели.

Результаты прогнозирования – наборы полей метеорологических величин, из которых основное внимание уделяется полям приземной температуры и осадков.

В данной статье приводятся результаты статистической коррекции прогнозов температуры и осадков на 1–4 месяца на примере территории водосбора Чебоксарского водохранилища, что в последствии позволит использовать предсказанные величины для прогноза притока воды к водохранилищу на основе модели формирования стока [11].

Обработка выходных данных прогнозов температуры и осадков по модели ПЛАВ

Начальными данными на изобарических поверхностях для модели ПЛАВ являются поля реанализа NCEP/DOE. Верификация также выполнялась по отношению к полям реанализа NCEP/DOE за соответствующий период [1, 10]. 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. Оперативный прогноз поддерживается формированием 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). Поскольку в

данном исследовании рассматриваются крупномасштабные процессы, для анализа используется более грубая сетка с разрешением 2,5 градуса.

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 этого необходимо было проведение комплекса работ по сбору и унификации прогностических и фактических данных. Фактические данные – поля реанализа (NOAA NCEP-DOE Reanalysis-2 [16]) и стационарные данные наблюдений.

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. либо 1983–2010 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 интенсивность очагов повышенного и пониженного температурного фона имеет видимые отличия. Аналогичные результаты получены для всех прогностических сезонов и для всех метеорологических полей. В климатических модельных полях осадков отмечаются некоторые пространственные сдвиги районов с высокими суммами осадков относительно фактического климата.

Рассчитаны коэффициенты линейного тренда (k) за 1981–2010 гг. фактических и модельных рядов в каждом узле сетки и осредненные по различным районам (например, табл. 1). В целом поля фактических и прогностических тенденций соответствуют друг другу. С увеличением заблаговременности прогноза (2–4 месяца) отмечается расхождение (чаще пространственное смещение)

очагов положительных (отрицательных) трендов модельных данных от фактических. Далее будет показано, что подобные смещения характерны для большинства прогностических полей, в связи с чем необходима процедура статистической коррекции и даунскейлинга (пространственной детализации сезонных прогнозов) [3, 4, 12–15].

Таблица 1

Средние по северной Евразии коэффициенты линейного тренда (гПа/10 лет и °С/10 лет) за 1981–2010 гг., рассчитанные по ретроспективным прогнозам модели ПЛАВ на первый месяц четырехмесячных периодов и по данным реанализа

		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
H500	ПЛАВ	6,03	6,15	3,21	3,45	3,56	1,61	3,89	2,85	1,86	5,15	6,75	7,59
	реанализ	6,41	3,45	4,95	3,3	4,2	2,76	3,04	2,56	2,27	4,79	5,63	5,88
T850	ПЛАВ	0,14	0,09	0,16	0,15	0,13	0,14	0,14	0,14	0,22	0,41	0,37	0,31
	реанализ	0,41	0,29	0,54	0,60	0,43	0,27	0,22	0,29	0,52	0,71	0,68	0,39
T2м	ПЛАВ	0,15	0,06	0,17	0,09	0,14	0,10	0,16	0,15	0,19	0,34	0,40	0,30
	реанализ	0,23	0,12	0,28	0,27	0,30	0,28	0,20	0,19	0,35	0,42	0,40	0,22

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

Для отбора оптимальных предикторов в схеме прогноза осадков использован регрессионный метод, сходный с представленным в [4, 14]. На данном этапе в качестве критерия отбора оптимальных предикторов используется коэффициент корреляции ACC, значимый на 5 % уровне (в зависимости от эффективного числа степеней свободы это значение очень незначительно колеблется около 0,37 [2]). Используется скользящее окно, размером от 500×500 до 1000×1000 км. Рассчитываются средние прогностические значения

в таких окнах и сравниваются с фактическими полями температуры и осадков.

Исходные прогностические данные $dX_0(x, y)$ предварительно корректируются по среднему квадратическому отклонению:

$$dX(x, y) = \frac{\sigma_F(x, y)}{\sigma_R(x, y)} dX_0(x, y) ,$$

где σ_F – среднее квадратическое отклонению прогностических рядов, σ_R – рядов реанализа. Рассмотрены варианты с различным пространственным смещением скользящего окна относительно искомого узла сетки. Обозначим координаты исходных узлов сетки – x_0, y_0 , узлов сетки, где отмечены максимальные значения АСС – x_{\max}, y_{\max} .

На втором шаге проводится процедура кроссвалидации (скользящего контроля), когда из выборки удаляется три случая, на остальных решается уравнение регрессии, предикторами в котором являются 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. Рассматриваются по четыре района с локальными максимумами и минимумами корреляции (1 и 2-й максимумы, 1 и 2-й минимумы). Решаются уравнения линейной регрессии с 1–3 предикторами. Во всех случаях наилучшие результаты получены для регрессии с двумя предикторами (улучшение качества при использовании трех предикторов статистически не значимо и приводит к увеличению неопределенности прогноза).

Для температуры уравнения имеют вид:

$$dt_{x_0, y_0} = a \cdot dt_{x_{\max}, y_{\max}} + b \cdot dX_{x_{\max}, y_{\max}} ,$$

где $dX_{x_{\max}, y_{\max}}$ – скорректированные по среднему квадратическому отклонению аномалии $H500(x_{\max}, y_{\max})$, либо $T850(x_{\max}, y_{\max})$. Для осадков первый предиктор не обязательно является $dPrec_{x_{\max}, y_{\max}}$.

Результаты статистической коррекции прогнозов ПЛАВ для бассейна Чебоксарского водохранилища

В качестве полигона для статистических экспериментов рассматривался бассейн Чебоксарского водохранилища. В Институте водных проблем РАН разработана методика догосрочного (заблаговременностью 3 месяца) ансамблевого прогноза сезонного притока воды к водохранилищу на основе модели формирования речного стока ЕСОМАГ [11]. Модель позволяет с удовлетворительной точностью рассчитать ежедневные расходы воды в реках бассейна по метеорологическим данным наблюдений. Для задания ансамбля возможных метеорологических условий за период заблаговременности гидрологического прогноза используются стохастические модели пространственно распределенных метеорологических воздействий на водосбор (т. н. стохастический генератор погоды). Параметры генератора погоды задаются с учетом ансамблевых полей температуры воздуха и осадков, спрогнозированных на период заблаговременности гидрологического прогноза с помощью гидродинамической модели ПЛАВ.

Координаты данного района: 33–48,5°E, 52–60°N. Число станций, освещающих метеорологическую обстановку в районе Чебоксарского водохранилища, составило 14. Количество узлов, содержащих данные интересующих метеопараметров из полей модели ПЛАВ и из реанализа NCEP/DOE, равнялось 24. Прогностические значения ПЛАВ представлялись в виде среднего по 10 членам ансамбля в каждой точке сетки. В данном исследовании представлены результаты расчетов для прогнозов на февраль–май и июнь–сентябрь. Были рассчитаны осредненные значения приземной температуры воздуха и кумулятивные значения осадков, соответственно, за весенний и летний период для каждого года.

Для оценки качества прогнозов применяются следующие показатели [5–7]: коэффициент корреляции знаков ρ , относительная ошибка прогноза, средний квадрат ошибки прогноза MSE, критерий качества по среднему квадрату ошибки – мера мастерства по отношению к климатическому прогнозу MSSS, коэффициент корреляции аномалий ACC. Так как нормы одинаковы для прогностических и фактических данных, то относительная ошибка прогноза является нормированным средним квадратом ошибки.

Видно, что качество прогнозов средней температуры на первый месяц без коррекции достаточно высокое (корреляция 0,58), 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 (для мая корреляция прогноза температуры без коррекции 0,07, с применением регрессии второго порядка $-0,58$ (табл. 2, 3).

Таблица 2

Средние коэффициенты корреляции и коэффициенты ρ прогнозов температуры. Бассейн Чебоксарского водохранилища

	Без коррекции		Вариант 1		Вариант 2	
	ACC	ρ	ACC	ρ	ACC	ρ
Февраль	0,58	0,34	0,59	0,46	0,68	0,59
Март	0,26	-0,03	0,51	0,46	0,61	0,62
Апрель	0,14	-0,23	0,43	0,33	0,55	0,48
Май	0,07	-0,07	0,50	0,37	0,58	0,55
ФМА	0,50	0,16	0,57	0,46	0,66	0,65
МAM	0,17	-0,14	0,39	0,27	0,49	0,44

Таблица 3

Среднее квадратическое отклонение прогнозов температуры MSE и мера мастерства MSSS. Бассейн Чебоксарского водохранилища

	Без коррекции		Вариант 1		Вариант 2	
	MSE	MSSS	MSE	MSSS	MSE	MSSS
Февраль	3,18	-0,23	2,94	-0,02	2,71	0,04
Март	2,47	-0,12	2,07	0,07	1,93	0,12
Апрель	2,47	-0,11	2,09	0,03	1,99	0,09
Май	2,10	-0,03	1,73	0,17	1,68	0,16
ФМА	1,95	-0,07	1,74	0,09	1,59	0,12
МAM	1,52	0,09	1,33	0,20	1,30	0,21

Оценки модельного прогноза количества осадков для внетропических широт даже на первый месяц не значительно выше порога значимости на 5 % уровне. Статистическая коррекция позволяет заметно улучшить качество прогноза (табл. 4, 5).

Таблица 4

Средние коэффициенты корреляции и коэффициенты ρ прогнозов осадков. Бассейн Чебоксарского водохранилища

	Без коррекции		Вариант 1		Вариант 2	
	ACC	ρ	ACC	ρ	ACC	ρ
Февраль	0,26	0,10	0,41	0,25	0,55	0,50
Март	0,07	0,0	0,49	0,35	0,61	0,56
Апрель	0,16	-0,07	0,44	0,32	0,63	0,61
Май	0,11	-0,13	0,47	0,30	0,67	0,59
ФМА	0,21	-0,01	0,42	0,36	0,50	0,48
МAM	0,10	-0,08	0,50	0,35	0,59	0,54

Таблица 5

Среднее квадратическое отклонение прогнозов осадков MSE и мера мастерства MSSS. Бассейн Чебоксарского водохранилища

	Без коррекции		Вариант 1		Вариант 2	
	MSE	MSSS	MSE	MSSS	MSE	MSSS
Февраль	14,00	-0,12	12,59	0,0	11,73	0,0
Март	12,57	-0,09	10,54	0,0	9,77	0,05
Апрель	12,97	-0,04	11,20	0,06	9,86	0,04
Май	16,07	-0,09	13,35	0,10	11,29	0,15
ФМА	25,71	-0,03	23,04	0,05	22,57	0,07
МAM	27,26	-0,09	22,58	0,09	21,56	0,10

Проводилась проверка качества скорректированных прогнозов при условии отклонения фактических сумм атмосферных осадков или температуры от нормы на $0,8\sigma$ в ту или другую сторону ($|dT| > 0,8\sigma$ и $|dPrec| > 0,8\sigma$). Коэффициент 0,8 выбран, поскольку

количество случаев $|dT| > \sigma$ и $|dPrec| > \sigma$ мало и оценки прогнозов будут незначимы даже на 10 % уровне значимости.

В табл. 6, 7 приведены величины коэффициентов корреляции между скорректированными прогнозами при наложенных условиях и фактическими значениями. В большинстве случаев средние оценки при условии $|dT| > 0,8\sigma$ и $|dPrec| > 0,8\sigma$ выше, чем для всех прогнозов. Жирным выделены значения корреляции, значимо превышающие исходные.

Таблица 6

Средние коэффициенты корреляции прогнозов температуры при условии $|dT| > 0,8\sigma$ и $|dPrec| > 0,8\sigma$. Бассейн Чебоксарского водохранилища

	$T_{np} < -0,8\sigma_T$	$T_{np} > 0,8\sigma_T$	$Prec_{np} < 0,8\sigma_{Prec}$	$Prec_{np} > 0,8\sigma_{Prec}$
Февраль	0,99	0,76	0,57	0,67
Март	0,80	0,86	0,72	0,84
Апрель	0,64	0,68	0,65	0,64
Май	0,60	0,81	0,61	0,80
ФМА	0,69	0,78	0,38	0,90
МAM	0,47	0,67	0,47	0,83

Таблица 7

Средние коэффициенты корреляции прогнозов осадков при условии $|dT| > 0,8\sigma$ и $|dPrec| > 0,8\sigma$. Бассейн Чебоксарского водохранилища

	$T_{np} < -0,8\sigma_T$	$T_{np} > 0,8\sigma_T$	$Prec_{np} < -0,8\sigma_{Prec}$	$Prec_{np} > 0,8\sigma_{Prec}$
Февраль	0,96	0,96	0,53	0,77
Март	0,72	0,59	0,62	0,46
Апрель	0,92	0,82	0,72	0,64
Май	0,71	0,66	0,59	0,64
ФМА	0,86	0,65	0,52	0,71
МAM	0,81	0,60	0,52	0,61

Интересные результаты получены для прогноза осадков в летний период (табл. 8). Отрицательные корреляции для исходного прогноза объясняются чаще всего пространственным смещением очагов положительных (отрицательных) трендов модельных данных относительно фактических. Подобные смещения характерны для большинства прогностических полей, в связи с чем и необходима процедура пространственной детализации сезонных прогнозов.

Таблица 8

Средние коэффициенты корреляции прогнозов осадков. Бассейн Чебоксарского водохранилища. Июнь–сентябрь

	Без коррекции	Вариант 1	Вариант 2
Июнь	-0,28	0,59	0,86
Июль	-0,71	0,71	0,81
Август	-0,68	0,74	0,84
Сентябрь	-0,39	0,45	0,82
Сезон ИИА	-0,68	0,68	0,74
Сезон ИСА	-0,29	0,62	0,78

Проверка качества прогнозов в сравнении с данными метеорологических станций не выявила значимых отличий от результатов, представленных в табл. 2–8.

Выводы

Апробирован один из методов статистической коррекции ансамблевых полей гидродинамической модели ПЛАВ для территории бассейна Чебоксарского водохранилища. Эти прогнозы будут использоваться в качестве входных данных при построении долгосрочного ансамблевого прогноза притока воды в водохранилище на основе гидрологической модели формирования речного стока.

Полученные оценки скорректированных ретроспективных прогнозов по модели ПЛАВ показали существенное улучшение качества прогнозов на историческом материале и продемонстрировали перспективность их использования для долгосрочного ансам-

блевого прогноза притока воды к водохранилищам. Показано, что скорректированные прогнозы в среднем имеют высокое качество в случаях значительных аномалий температуры и осадков.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-37-0053) в Гидрометцентре России.

Список использованных источников

1. Бундель А.Ю., Вильфанд Р.М., 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.

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

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

4. Крыжов В.Н. Региональная коррекция глобальных сезонных прогнозов Гидрометцентра России для Северной Евразии // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 5. – С. 5–14.

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

6. Муравьев А.В. Стандартизированная система верификации долгосрочных метеорологических прогнозов. (SVS LRF) // 80 лет Гидрометцентру России. – М.: Триада, лтд, 2010. – С. 264–288.

7. Наставление по глобальной системе обработки данных и прогнозирования. Том I. (Дополнение IV к Техническому регламенту ВМО). Глобальные аспекты. Издание 1992 г. ВМО-№ 485. Добавление II.8. Стандартная система проверки оправдываемости (ССПО) долгосрочных прогнозов (ДП). – Женева, Швейцария: Секретариат ВМО, 2005. – 173 с.

8. Толстых М.А. Полулагранжева модель атмосферы с высоким разрешением для численного прогноза погоды // Метеорология и гидрология. – 2001. – № 4. – С. 5–16.

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

10. Хан В.М., Вильфанд Р.М., 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.
11. Gelfan, A., Motovilov Yu., Moreido V. Ensemble seasonal forecast of extreme water inflow into a large reservoir // *Proc. IAHS*. – 2015. – Vol. 369. – P. 115–120. – proc-iahs.net/369/115/2015/ doi:10.5194/piahs-369-115-2015
12. Kryjov V.N., Kang H.-W., Nohara D., Song B.-G., Lee D.-Y., An K.-H., Sohn S.-J., Min Y.-M., Saji N.H., Tam C.Y.F. Assessment of the Climate Forecasts Produced by Individual Models and MME Methods // *APCC Technical Report*. – 2006. – Vol. 1, No. 1. – 534 p.
13. Kryjov V.N. Seasonal climate prediction for North Eurasia // *Environmental Research Letters*. – 2012. – Vol. 7. – P. 015203. – doi:10.1088/1748-9326/7/1/015203.
14. Min Y.-M., Kryjov V.N., Oh J.-H. Probabilistic interpretation of regression-based downscaled seasonal ensemble predictions with the estimation of uncertainty // *Journal of Geophysical Research*. – 2011. – Vol. 116. – D08101. – doi:10.1029/2010JD015284.
15. 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.
16. 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 14.09.2015 г.