

ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ СЕЗОННЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ, ВЫПУСКАЕМЫХ В ГИДРОМЕТЦЕНТРЕ РОССИИ/СЕАКЦ

В.М. Хан, И.А. Куликова, Р.М. Вильфанд

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации

Россия, Москва

E-mail: khan@mecom.ru

Ключевые слова: климатические прогнозы, гидродинамическое моделирование, предсказуемость, климатическое обслуживание, ансамблевый подход

Аннотация: Обсуждаются новые тенденции и направления в развитии метеорологического прогнозирования в Гидрометцентре России/СЕАКЦ на сезонных интервалах времени. Задачи уменьшения неопределенности прогнозов будущего состояния атмосферы решаются с использованием ансамблевых прогностических систем на базе глобальной полулагранжевой конечно-разностной модели атмосферы ПЛАВ Гидрометцентра России и Института вычислительной математики (ИВМ) РАН с расширенным (до 61 члена) ансамблем прогнозов, а также недавно внедренной в оперативную работу климатической модели ИВМ РАН (INM-CM5) с 20 членами ансамбля прогнозов. На конкретном примере сопоставления вероятностного и детерминистского представления прогнозов режимов циркуляции, связанных с положительной и отрицательной фазами индекса Северо-Атлантического колебания (NAO) продемонстрировано преимущество вероятностного подхода в целях расширения временного интервала «полезности» прогнозов по сравнению с детерминистическим подходом. Для оценки потенциальной экономической эффективности прогнозов представлен анализ затрат и потерь прогнозов аномалий температуры и осадков на недельном и месячном интервалах интегрирования, что позволяет оценить их экономическую эффективность для различных потребителей, в том числе для транспортной отрасли. Полученные выводы помогут определить будущие исследования в области специализированного климатического прогнозирования в России.

1. Введение

Прогностическая климатическая система Гидрометцентра России/СЕАКЦ основывается на комплексном использовании синоптических, статистических и гидродинамических методов. Однако в связи с ростом вычислительных и информационных технологий в последние годы развитие и усовершенствование ДМП перенесли в область гидродинамического моделирования. При составлении сезонных прогнозов основных метеорологических полей успешно используется полулагранжева глобальная конечно-разностная модель общей циркуляции атмосферы ПЛАВ [Толстых и др., 2017]. Модель ПЛАВ хорошо себя зарекомендовала в научно-оперативной практике по долгосрочным прогнозам, и это позволило Гидрометцентру России получить статус Глобального центра продуцирования сезонных прогнозов в системе Всемирной Метеорологической Организации в 2009 году. Однако уровень требований к гидродинамическим моделям с каждым днем повышается. Актуальным встал вопрос

об использовании климатической модели океан-атмосфера в прогностической деятельности. В рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (ВИП ГЗ) в части разработки глобальной модели Земной системы мирового уровня для исследовательских целей и сценарного прогнозирования климатических изменений, повышения точности климатических моделей и надежности климатических прогнозов» в ФГБУ «Гидрометцентр России» совместно с ФГБУН "ИВМ РАН" разработана система глобального ансамблевого сезонного прогноза на основе глобальной климатической модели INM-CM5 [Володин и др. 2017]. Версия модели INM-CM5 с разрешением модели 2×1.5 градуса в атмосфере с 73 уровнями до 60 км по вертикали, и 0.5×0.25 градуса в океане с 40 уровнями по вертикали после успешного прохождения испытаний по решению Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиофизическим прогнозам Система сезонного прогнозирования на базе модели INM-CM5 в декабре 2023 г. внедрена в оперативную практику Гидрометцентра России. Основные виды продукции [Киктев и др. 2015, 2017; Хан 2017, Хан и др. 2023], выпускаемые на основе упомянутых выше моделей, размещаются на сайте Северо-Евразийского климатического центра (<http://neacc.meteoinfo.ru/>), координатором которого является Гидрометцентр России.

Неопределенность является атрибутом любого прогноза независимо от срока и места его действия. Некоторая неопределенность будущего состояния атмосферы не может быть полностью снята силой современной науки. Для гидродинамических прогнозов неопределенность связана, с одной стороны, с недостаточной точностью применяемых уравнений гидротермодинамики и их параметризаций, а также с неполнотой и ошибками в информации о начальных и граничных условиях, с другой, – с хаотическим поведением самой атмосферы. Неопределенность является объективной причиной существования предела предсказуемости погоды, который в настоящее время даже для лучших гидродинамических моделей обычно не превышает 1-2 недель (речь идет о предсказуемости 1-го рода, т.е. о возможности прогнозирования метеорологических элементов в данном месте и в данный момент времени).

В последние годы вопросы снятия некоторой неопределенности будущего состояния атмосферы решаются на базе ансамблевых прогностических систем. Ансамбли прогнозов позволяют снизить величину неопределенности, связанную с первоначальными ошибками объективного анализа – начальными данными (лаговое интегрирование, метод – бридинга или метод выращивания наиболее быстро растущих мод), а также ошибками, вызванными несовершенством самой модели (возмущения физики самой модели, устранение систематических ошибок, мультимодельный подход). Появляется реальная возможность с помощью ансамбля прогнозов аппроксимировать изменения функции распределения вероятностей, заменяя тем самым математическое решение проблемы, основанное на динамико-стохастических уравнениях и требующее больших и дорогостоящих вычислительных ресурсов. Прогностическая климатическая система Гидрометцентра России/СЕАКЦ также является ансамблевой, позволяющая представлять прогнозы в вероятностном виде.

На конкретном примере в данной работе продемонстрировано преимущество вероятностного представления прогнозов режимов циркуляции, связанных с положительной и отрицательной фазами индекса Северо-Атлантического колебания (NAO). В качестве исходной информации использовались оперативные прогнозы модели ПЛАВ полей геопотенциала поверхности 500 гПа (H-500) на летний и зимний сезоны 2018-2021 гг., стартовавшими (на 46 суток) от различных начальных дат с недельным интервалом. Эталонными полями, с которыми сравниваются результаты гидродинамического моделирования, служат осредненные для тех же временных

интервалов индексы, полученные на базе реанализов ЕЦСПП (ERA- 5) средних суточных полей геопотенциала поверхности 500 гПа (H500). Приводятся оценки качества детерминистических (средних по ансамблю) и вероятностных недельных – на 1, 2, 3, 4 недели (1-7, 8-14, 15-21, 22-28 сутки соответственно) и два месячных интервала – месяц 1 (1-30 сутки), месяц 2 (16-45 сутки)) прогнозов режимов циркуляции, связанных с положительной и отрицательной фазами индекса Северо-Атлантического колебания (NAO). Оценками качества детерминистических прогнозов служат критерии ETS (Equitable Threat Score) [Wilks, 2011] и EDI (Extremal Dependence Index) [Ferro, 2012; ForVER, 2012], а также среднее квадратическое отклонение s - мера ошибки прогноза. В качестве интегральной оценки вероятностных прогнозов используется площадь под кривой AROC, построенная в координатах FAR и HR ($0 \leq \text{AROC} \leq 1$), где FAR и HR соответственно «доля ложных тревог» и «доля попаданий» [Муравьев и Вильфанд, 2000; Standardized Verification, 2002]. Результаты расчетов показывают, что за пределами первой прогностической недели качество детерминистических (средних по ансамблю) прогнозов резко падает. Использование вероятностного подхода позволяет расширить временной интервал «полезности» прогнозов по сравнению с детерминистическим подходом от одной недели до месяца. В тоже время на временных интервалах интегрирования в пределах второй, третьей и четвертой недели степень неопределенности долгосрочных прогнозов остается весьма высокой, а «атмосферная память» лимитируется неустойчивостью атмосферных процессов, характерной для атмосферных процессов, протекающих в умеренных широтах.

В соответствии с рекомендациями ВМО [Use of Climate Prediction, 2016] климатическая продукция должна учитывать запросы и идеологию пользователей, чтобы облегчить им принятие решений и позволить с большим обоснованием прибегнуть к выбору той или иной информации. Использование ансамблевых прогностических систем, на базе которых осуществляется выпуск прогнозов в вероятностной форме, переводит данную проблему на качественно новый уровень и позволяет расширить круг пользователей климатической продукцией. Как показывает мировая практика [Richardson, 2000a], вероятностные прогнозы, полученные на основе ансамблей, приносят больше пользы, чем детерминированные прогнозы, полученные с помощью той же модели. Количественная оценка неопределенности прогноза с помощью ансамбля может повысить итоговую прибыль компании и увеличить потенциальную экономическую ценность климатических прогнозов [Zhu et al., 2002].

На практике обычно используется простая модель принятия решений, в которой все потенциальные пользователи климатических прогнозов могут ориентироваться на соотношение между стоимостью своих действий по предотвращению ущерба, связанного с климатом, и потерями, которые они несут в случае, если они не проводят защитные мероприятия. При этом экономическая полезность или, иными словами, экономический эффект прогностической системы определяется путем оценки *экономической зависимости* конкретного потребителя от прогнозируемого явления с помощью анализа затрат и потерь (cost-loss analysis) различной сложности [Richardson, D. S., 2000a; Richardson, D. S., 2000b; Zhu et al., 2002]. По мнению автора [Mylne, 2002], оценка прогнозов «в терминах сэкономленных денег» намного важнее для пользователя, чем все прочие стандартные оценки.

Оценки экономической полезности прогнозов относительно климатологии (стоимости, эффективности, economic value) базируются на тех же таблица сопряженности, что и кривые ROC. При этом в ячейки таблицы сопряженности добавляются возможные издержки, индивидуальные для каждого потребителя. Потенциальная экономическая эффективность прогностической системы представляется следующим образом:

$$V = \frac{E_{climate} - E_{forecast}}{E_{climate} - E_{perfect}} = \frac{Min[o,r] - (h+f)r - m}{Min[o,r] - o \cdot r},$$

где $E_{climate}$, $E_{forecast}$, и $E_{perfect}$ – ожидаемые затраты при использовании исключительно климатологии, методического прогноза и «идеального» прогноза; h и f – оценки вероятности попаданий и ложных тревог в таблице сопряженности «прогноз явления - факт», o – климатическая повторяемость явления, r – отношение возможных затрат и потерь потребителя (известное из экономики cost/loss-ratio). Таким образом, экономическая эффективность прогностической системы зависит от двух основных параметров: h и m , характеризующих соответственно долю «попаданий» и долю ложных «тревог» (т.е. качество прогнозов) и используемых также при расчетах параметра ROC. С другой стороны, величина V определяется климатической повторяемостью явления и соотношением между затратами и потерями потребителя $г$. Если $V < 0$, то прогностическая система обходится пользователю дороже, чем климатическая информация.

Рассчитаны оценки экономической эффективности (V) в зависимости от отношения между затратами и потерями потребителя ($г$) при прогнозе аномалий температуры воздуха и осадков выше и ниже нормы на недельном и месячном интервалах интегрирования. В качестве исходной информации используются ретроспективные прогнозы ПЛАВ. Как и следовало ожидать, наибольшие положительные значения эффективности (V) наблюдаются на недельном интервале интегрирования. На месячном интервале интегрирования с нулевой заблаговременностью положительный эффект, хотя и уменьшается, но сохраняется. Затрачивая, скажем, 100 единиц стоимости при доверии к прогнозу, можно избежать 300 единиц потерь при отсутствии доверия к прогнозу и при одновременном наступлении данного явления. Для осадков данные закономерности относительно сроков прогноза сохраняются. Однако в целом уровень экономической эффективности прогнозов осадков по сравнению с температурой воздуха снижается. Напомним, что аномалии температуры воздуха и осадков тесно связаны с различными показателями экономической деятельности, в том числе в транспортной отрасли

Список литературы

1. Use of Climate Prediction to Manage Risks // WMO-No. 1174. 2016. 39 p.
2. Володин Е.М., Мортиков Е.В., Кострыкин С.В. и др. Воспроизведение современного климата в новой версии модели климатической системы // ИВМ РАН. Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53, № 2. С. 164-178.
3. Толстых М.А., Шашкин В.В., Фадеев Р.Ю. и др. Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза. М., 2017. 167 с.
4. Киктев Д.Б., Хан В.М., Крыжов В.Н., Зарипов Р.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Тищенко В.А. Технология выпуска долгосрочных прогнозов Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) // Труды Гидрометцентра России. 2015. Вып. 358. С. 36-58.
5. Киктев Д.Б., Толстых М.А., Зарипов Р.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Тищенко В.А., Хан В.М. Выпуск детализированных метеорологических прогнозов в рамках деятельности Северо-Евразийского климатического центра // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 366. С. 14-28.
6. Хан В.М. Концепция региональных климатических форумов ВМО и вклад Северо-Евразийских климатических форумов в ее реализацию // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 366. С. 5-13.
7. Хан В.М., Вильфанд Р.М., Тищенко В.А., Емелина С.В., Грицун А.С., Володин Е.М., Воробьева В.В., Тарасевич М.А. Оценка изменений температурного режима по Северной Евразии на предстоящее пятилетие по прогнозам модели Земной системы ИВМ РАН и их возможных последствий для сельского хозяйства // Метеорология и гидрология, 2023, № 9. С. 14-28.
8. Муравьев А.В., Вильфанд Р.М. О стандартизации оценок качества прогнозов на средние и долгие сроки // Метеорология и гидрология. – 2000. - № 12. - С. 24-34.
9. Standardized Verification System (SVS) for Long-Range Forecasts (LRF). New Attachment II-9 to the Manual on the GDPS (WMO-No. 485). - Geneva, WMO, 2002, vol. I, 21 p.

10. Zhu, Yuejian & Tóth, Zoltán & Wobus, Richard & Richardson, David & Mylne, Ken. (2002). The Economic Value Of Ensemble-Based Weather Forecasts. Bulletin of The American Meteorological Society - BULL AMER METEOROL SOC. 83. 10.1175/1520-0477(2002)083