

Отзыв
на диссертацию Быкова Филиппа Леонидовича

**ПОСТПРОЦЕССИНГ ЧИСЛЕННЫХ ПРОГНОЗОВ ПРИЗЕМНЫХ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ
МЕТОДОВ**

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

В последние два десятилетия наблюдается значительный рост качества среднесрочных и краткосрочных численных прогнозов погоды. Это объясняется: (1) резким возрастанием мощности компьютеров, позволяющим использовать высокое пространственное разрешение, более подробную формулировку физических процессов и многомасштабный подход; (2) колоссальным увеличением объема наблюдательной информации и развитием методов её ассимиляции и (3) совершенствованием методов обработки и представления прогнозируемой информации (постпроцессинга).

Тем не менее понятно, что прогностические модели никогда не станут совершенны из-за многомасштабности и нелинейности атмосферных процессов и неизбежных погрешностей алгоритмов физической параметризации атмосферных процессов. Даже грядущее увеличение мощности компьютеров не гарантирует кардинального улучшения прогноза из-за сложности мелкомасштабных физических процессов. Представленная работа как раз направлена на разработку новых методов постпроцессинга, основанных на мощном и уже хорошо разработанном аппарате нейронных сетей (Neural Networks). Фактически это направление позволяет использовать для улучшения прогноза огромную предшествующую информацию, которую не учитывали прогностические модели.

Несколько слов о том, почему автор данного отзыва, работающего последние годы в области физики океана и, в частности, моделирования и прогноза ветрового волнения, согласился оценить работу, посвящённую постпроцессингу атмосферного прогноза. В течение 13 лет я работал в прогностическом центре NOAA/NWS (National Weather Service), где мне пришлось заниматься разнообразной работой, начиная с ремонта отдельных блоков среднесрочной атмосферной модели MRF, моделированием океана и участием в создании всемирно известной модели прогноза ветровых волн WAVEWATCH. С техникой Neural Network меня познакомил один из пионеров этой деятельности В.М. Краснопольский. Я предложил Краснопольскому поработать со мной и Х. Толманом над созданием экономной схемы расчёта интеграла Хассельманна, описывающего эффект нелинейных взаимодействий в ветровых волнах. Этот алгоритм был разработан на основе технологии Neural Network, и он дал огромный эффект: расчёты ускорились более чем в тысячу раз практически без потери точности. Далее эта же технология была нами использована для аппроксимации алгоритма расчёта радиационных спектральных потоков в атмосфере. Эти и многое другие результаты были описаны в монографии Краснопольского, изданной издательством Springer.

Диссертация Быкова посвящена принципиально другому виду использования технологии Neural Network. В упомянутых выше примерах зависимость между объектами была полностью сформулирована, так что работа сводилась к аппроксимации сложного

алгоритма с целью кардинального ускорения вычислений. Это направление активно развивается, но основные приложения NN, как и рецензируемая работа, направлены на отыскание зависимости между переменными сложной структуры, причём свойства этой зависимости остаются неизвестными. Предполагается, что обработка данных прогноза позволяет повысить его точность и расширить состав прогнозируемой информации. Идея данной работы состоит в привлечении данных в течение некоторого периода, предшествующего прогнозу. Разработанная система применима в случаях частичного отсутствия прогностической информации. Работа посвящена разработке оперативной коррекции результатов прогноза в районах метеостанций на основании погрешностей предшествующих прогнозов применением нелинейного NN оператора. NN техника также используется для прямой и обратной интерполяции данных между сетками и станциями. Поскольку коэффициенты в NN не могут быть неизменны, предполагается систематическая оптимизация её параметров. Испытывается несколько конфигураций схемы. Поскольку на входе в систему постпроцессинга в оптимальном варианте приходит несколько схем, но иногда возможно отсутствие одной и более схем, было необходимо предусмотреть большое количество различных конфигураций постпроцессинга.

Таким образом, для решения важной задачи уточнения метеорологического прогноза предлагается мощный и хорошо разработанный аппарат NN, применяемый в настоящее время в самых различных областях, начиная от анализа изображений и кончая экономикой. Наряду с прямой работой по усовершенствованию физического содержания моделей (т.е. различных параметризаций, которые могут также быть основаны на NN) применение NN технологии является важным направлением в прогнозе динамики окружающей среды и геофизической гидродинамики. Практическая ценность работы вполне очевидна и подтверждается соответствующими документами.

Работа использует довольно сложный аппарат, требующий достаточно громоздких описаний. Оппонент не ставил себе цели разбираться во всех математических деталях работы, правильности которых он безусловно доверяет, имея в виду высокую математическую и вычислительную квалификацию автора, опубликовавшего по теме достаточно работ в изданиях с высоким рейтингом и сделавшего много докладов в различных собраниях. Признаюсь, что обзор технологий нейронных сетей в Главе 1 оказался для оппонента очень содержательным и полезным. В Главе 1 обсуждаются также состав используемых для анализа данных и технологические проблемы реализации разработанных кодов.

Глава 2 посвящена коррекции прогноза. При использовании коррекции прогноза применение технологии NN позволяет отказаться от априорных предположений о линейности и статистических свойствах полей ошибок. Показано на численных экспериментах на многолетних архивах по обширной территории, что этот способ коррекции существенно улучшает результаты по сравнению с традиционными методами. Показано, что квазилинейные версии систематической коррекции и метод комплексного прогноза обладают значительными преимуществами над их линейными версиями. Описанный метод постпроцессинга, основанный на NN, увеличивает качество прогноза, соответствующее уменьшению заблаговременности на одни сутки.

В Главе 3 метод коррекции, основанный на нейронных сетях, использует расширенный список предикторов, включая отличные от корректируемых, а также прогнозы с другой заблаговременностью. Утверждается, что метод целесообразно

применять к исходному прогнозу. Это расширение множества предикторов также приводит к уменьшению погрешности окончательного прогноза.

Метеорологическая информация представляется в двух формах: в узлах расчётных сеток, различных в разных моделях, и в пунктах измерений. Переход от одного вида информации в другой является далеко не тривиальной задачей, решавшейся до недавнего времени в предположении об однородности и изотропности полей. В Главе 4 нейронная техника используется для нелинейной и неоднородной интерполяции в узлы расчётной сетки. Разумеется, этот метод гораздо гибче и точнее, чем предшествующие методы, накладывавшие жёсткие условия на статистические свойства полей. Показано, например, что этот метод даёт уменьшение средней абсолютной погрешности прогнозов температуры примерно на один градус.

Обширные иллюстрации эффективности разработанных методов постпроцессинга описаны в Главе 5. На Рис 5 показано, что метод, основанный на квазилинейной системе коррекции и коррекции на основе NN, даёт наилучшие результаты по сравнению со всеми другими видами прогноза и постпроцессинга для всех рассмотренных регионов и для всех главных метеорологических параметров: температуры, влажности и скорости ветра. Далее показано также, что разработанная схема имеет наилучшую по сравнению с лучшей из рассмотренных моделей предупредительность порывов ветра. Прогноз доли ложных тревог в целом не улучшился, но невыполнение неприятных обещаний, как известно, прощается легче.

Аналогичные улучшения достигнуты для прогноза приземного давления. Особенно заметны повышение оправдываемости для минимальной ночной и максимальной дневной температур воздуха. Повышение качества прогноза продемонстрировано также для больших междусуточных изменений экстремальных температур.

Выводы из главы 5 суммируют преимущества разработанной схемы.

Новизна рецензируемой работы состоит в предложении использовать нейронные сети для систематической коррекции прогноза, с учетом предыдущих прогностических данных разной заблаговременности, а также для обобщения данных, полученных с несколькими прогностическими моделями с разным разрешением. При этом используемая корреляционная функция зависит не от физического расстояния, а от расстояния в многомерном фазовом пространстве. Разработан метод квазилинейной неоднородной и анизотропной интерполяции данных на основе нейронных сетей, которая является безусловным шагом вперёд по сравнению с традиционной однородной и изотропной оптимальной интерполяцией.

О практической ценности работы, направленной на улучшение метеорологического прогноза, можно особо не распространяться. Получены многочисленные отзывы из организаций, использующих в своей деятельности данные метеопрогноза. Результаты работы опубликованы в многочисленных публикациях и много раз излагались в докладах на конференциях. Обсуждаются перспективы дальнейшего развития применений нейронных сетей в геофизике.

В отзыве необходимо указывать негативные стороны. Среди них надо отметить чрезвычайную сложность и громоздкость системы, разработанной автором. Это свидетельствует о высочайшей квалификации автора и его работоспособности и вместе с тем вызывает некоторые сомнения в универсальности и надёжности системы. Например, при изменениях параметров моделей, скажем, вариации вертикального разрешения или

схемы параметризации пограничного слоя и поверхностных процессов, может потребоваться пересмотр списка предикторов и даже внутренних параметров NN схемы. Я был свидетелем того, что модификации модели MRF/NWS происходили систематически. Следовательно, система коррекции требует непрерывной работы по её поддержанию в рабочем состоянии.

Любопытно, что вклад различных моделей для некоторых параметров прогноза не всегда растёт с увеличением формального качества моделей (например, разрешения модели), т.е. различные модели хороши или не очень хороши в разных смыслах. В принципе, это неблагоприятное обстоятельство говорит о том, что лучше всего было бы иметь одну модель, сочетающую преимущества всех моделей. Список возможных предикторов на самом деле очень велик, и их важность зависит от их роли в физических и динамических атмосферных процессах. У меня создалось впечатление, что список предикторов выбран в некоторой степени формально, без обсуждения их роли в реальной среде. Оценка важности предикторов, показанная на Рис. 3, не оставляет впечатления, что все они должны быть использованы, поскольку оценки, относящиеся к 'хвосту' распределения, очень малы. Нет сомнения, что удаление из рассмотрения некоторых предикторов не изменило бы оценки успешности. Такие эксперименты проводились. Но их описание, видимо, привело бы к удвоению текста.

Данные на Рис. 5.1 Главы 4 показывают значительные расхождения между результатами, полученными разными моделями. К сожалению, этот материал трудно воспринимать из-за перегруженности графиков и обилия аббревиатур. Ввиду важности этих данных, следовало бы дать краткие качественные разъяснения с указанием специфики моделей, поскольку они явно не сравнимы хотя бы по подробности включённой физики и разрешению. Для убедительной иллюстрации роли постпроцессинга следует сравнивать равноценные модели. Иначе преимущества разработанной схемы кажутся преувеличенными. Поскольку результаты работы достаточно убедительны, она в этом не нуждается.

При формулировке следующего замечания, которое является скорее вопросом, я апеллирую к собственному опыту. Мы работали над аппроксимацией довольно сложной зависимости между двумерными полями с числом степеней свободы для каждого порядка тысячи. Обучение велось не для самих полей, а для коэффициентов разложения на базе ортогональных функций. Количество исходных данных у нас было не ограничено, и коэффициенты NN вычислялись с высокой достоверностью. Применение построенной схемы к индивидуальным случаям показало высокую эффективность и точность метода с важным исключением: в отдельных редких случаях схема не работала совсем, т.е. давала большие расхождения с исходным точным методом. Поскольку это было неприемлемо, недоразумение устранялось силовыми методами.

Вопрос состоит в следующем: встречались ли Вы с такими ситуациями, а если да, то как с ними быть?

В Заключение укажу, что на мой взгляд, работа, оформленная как полноценный технический отчёт, перегружена деталями, которые сильно затрудняют её чтение и понимание для выработки её оценки. Следовало бы ряд специфического материала дать в приложении, а в основном тексте дать больше качественных пояснений для чего всё это делается. Я рекомендую своим аспирантам быть более милосердным к оппонентам.

Автор не публиковал результаты в ведущих мировых журналах по метеорологии, физике атмосферы и прогнозу, так что его работы мало известны в международном научном сообществе. Это печально. Между тем, уровень работ Ф.Л. Быкова выше уровня большинства зарубежных статей, публикуемых по этим темам.

Приведённые выше замечания относятся скорее к форме представления результатов. Замечания не относятся к оценке значимости и научного содержания работы. Работа выполнена на высоком научном и вычислительном уровне. Автор обнаруживает высокую математическую культуру и глубокое понимание сложной теории и технологии подхода, основанного на нейронных сетях и математической статистике. Я бы сказал, что работы такого объёма, уровня и значимости в нескольких других обстоятельствах вполне заслуживали бы присуждения и докторской степени. Считаю, что автор представленной работы Быков Филипп Леонидович заслуживает присвоения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы.

Чаликов Дмитрий Викторович

Доктор физ.-мат. наук, профессор
Главный научный сотрудник
Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН
Санкт-Петербургский филиал.
Почетный профессор, Университет Мельбурна,
+7 911 023 66 44
dmitry-chalikov@yandex.ru

*Подпись руки Д.В. Чаликова
заверяю.*



В.А. Кривошеев

18.01.2022.

