

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
учреждения «Федеральный

исследовательский центр Институт

прикладной математики имени М.В.

Келдыша Российской академии наук»

член-корреспондент РАН

А. И. Аптекарев

«02» июня 2022 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук" о диссертации Быкова Филиппа Леонидовича «Постпроцессинг численных прогнозов приземных метеорологических параметров на основе нейросетевых методов», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Диссертационная работа Ф.Л. Быкова посвящена разработке математических методов прогноза метеорологических явлений в атмосфере на основе коррекции численных прогнозов приземных метеорологических параметров для вычисления поправок с помощью нейронной сети. Основным результатом работы является разработка новой математической методологии на основе нейронных сетей и нового автоматизированного комплекса обработки выходных данных численных моделей прогноза погоды с учетом метеорологических наблюдений синоптических станциях.

Возможности традиционных методов прогноза погоды, например гидродинамических методов на основе численного решения многомерных уравнений в частных производных, зачастую оказываются недостаточными, и требуется их радикальное усовершенствование. В этом отношении результаты, содержащиеся в диссертации Ф.Л. Быкова, несомненно, представляются новыми, важными и актуальными.

Актуальность темы диссертационного исследования Ф.Л. Быкова хорошо раскрыта в диссертации и автореферате – она обусловлена бурным развитием методов машинного обучения и нейронных сетей. Но в оперативных прогнозах погоды, судя по публикациям, новейшие методы машинного обучения применяются пока еще редко и не доведены до уровня практического использования.

В проведенном Ф.Л. Быковым исследовании метод нейронных сетей применяется в задаче постпроцессинга прогнозов приземных метеорологических параметров. Под

постпроцессингом в данном случае понимается автоматизированная обработка результатов численных моделей прогноза погоды с целью улучшения качества прогнозов. Диссертант использует набор от одной или до семи численных моделей прогноза погоды с заблаговременностью до 144 часов. Методика, предложенная Быковым, уточняет прогнозы следующих метеорологических параметров по территории России, Белоруссии и государств Средней Азии:

- А) температуры воздуха и точки росы на высоте 2 метра;
- Б) давления, приведенного к уровню моря;
- В) скорости и направления ветра на высоте 10 метров (включая порывы ветра).

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников (257 наименований) и трёх приложений.

В первой главе вводятся общие понятия градиентного машинного обучения, обосновывается выбор нейросетевых методов для решения задачи постпроцессинга. Диссертант разбил задачи уточняющего постпроцессинга прогнозов приземных метеорологических параметров А) - В) на подзадачи.

Главы 2–4 диссертации посвящены рассмотрению следующих подзадач: 1) систематической коррекции (комплексификации) прогнозов на основе последних наблюдений на рассматриваемой метеорологической станции; 2) дополнительной коррекции прогнозов с учётом прогнозов, сдвинутых по начальному сроку и заблаговременности; 3) интерполяции найденных поправок из точек синоптических станций в точки, прогноз в которых необходимо рассчитать.

В заключительной, пятой главе диссертации проведены сравнительные оценки качества прогнозов погоды, рассчитанных предлагаемым постпроцессингом в оперативном режиме за период с 1 октября 2020 г. по 31 марта 2021 г, а в приложении А – за период с 1 мая по 30 сентября 2021 г. Полученные оценки демонстрируют превосходство прогнозов, прошедших постпроцессинг, над исходными прогнозами численных моделей прогноза погоды.

Особый интерес и научную значимость представляет предложенная Быковым **двумерная квазилинейная неоднородная оптимальная интерполяция**, обобщающая метод оптимальной интерполяции и позволяющая отказаться от гипотез однородности, изотропности и гауссовости интерполируемого случайного поля, а также линейности оператора интерполяции. В стандартном подходе к параметризации оптимальной интерполяции строится выборочная корреляционная функция (так называемая коррелограмма), а оптимальность интерполяции следует из предположения о том, что гладкая аппроксимация, найденной по выборке коррелограммы в классе положительно

определенных корреляционных функций, является истинной корреляционной функцией интерполируемого поля. При невысоком качестве полей первого приближения коррелограмма (согласно теореме Гаусса-Маркова) оказывается смещенной и последнее предположение оказывается неверным. Ф.Л. Быков предлагает находить неоднородную анизотропную корреляционную функцию, минимизируя погрешность интерполяции в точку «пропущенной» станции методом градиентного спуска, вычисляя градиенты методом обратного распространения ошибки, что позволяет при оценке корреляционной функции не использовать выборочные корреляции и отказаться от предположений о несмещённости коррелограммы. Продемонстрировано, что предложенный новый метод улучшает качество интерполяции приземных полей температуры воздуха, точки росы, скорости ветра. Применение новой интерполяционной процедуры может улучшить качество интерполяции других физических полей, не удовлетворяющих гипотезам однородности и изотропности в тех случаях, когда причины их неоднородностей индуцируются известными пространственными характеристиками, например, орографией или полями первого приближения.

Новизна полученных результатов и выводов. При решении поставленных задач методами, основанными на нейронных сетях, получены следующие новые научные результаты, имеющие важное практическое значение:

1. При использовании нейронных сетей для вычисления коэффициентов систематической коррекции по сравнению с методом коррекции с экспоненциальным сглаживанием, средняя абсолютная погрешность прогнозов А-В) значительно меньше, она уменьшена на величину, эквивалентную уменьшению заблаговременности на 1 сутки.
2. Показано, что при дополнительной коррекции прогнозов, подвергнутых систематической коррекции, использование параметров, индивидуальных для данной станции незначительно уменьшает средние абсолютные погрешности прогнозов: менее чем на 0.02°C для прогнозов температуры воздуха на высоте 2 м; менее чем на 0.01°C для прогнозов точки росы на высоте 2 м; менее чем на 0.005 гПа для прогнозов давления, приведенного к уровню моря; до 0.005 м/с для прогнозов модуля скорости ветра на высоте 10 м. Отсюда следует, что при отсутствии индивидуальных параметров станций уже достигнуто высокое качество прогнозов, прошедших постпроцессинг, в точках синоптических станций, данные с которых доступны хотя бы за последний месяц.
3. Впервые предложена двумерная квазилинейная неоднородная анизотропная оптимальная интерполяция, которая основана на применении метода оптимальной

интерполяции после вычисляемого нейронной сетью вложения рассматриваемой двумерной области на поверхности Земли в пространство бóльшей размерности. Продемонстрировано, что такая интерполяция для найденных ранее поправок в точках синоптических станций уменьшает погрешность поправленных прогностических полей. Погрешности температуры воздуха, точки росы и скорости ветра в точках «пропущенных» станций по сравнению с методом однородной изотропной оптимальной интерполяции уменьшаются: для температуры воздуха на $0,03 - 0,19$ °С, для точки росы на $0,04 - 0,24$ °С, для модуля скорости ветра на $0,02 - 0,18$ м/с. Полученные улучшения различаются в зависимости от заблаговременности прогноза, времени года, времени суток и региона оценки.

Для решения сформулированных в диссертационной работе задач использованы теоретические результаты и методы линейной алгебры, математического анализа, функционального анализа, интерполяции, оптимизации, математической статистики и теории вероятностей, теории случайных полей, статистической обработки больших данных, нейронных сетей и машинного обучения, а также методы структурного и объектно-ориентированного программирования и различные методики оценки качества метеорологических прогнозов.

Практическая значимость результатов диссертационной работы. Ценность результатов состоит в создании эффективного инструмента – автоматизированного комплекса численных прогнозов погоды, который применяется в повседневной практике, и результаты публикуются на нескольких интернет-сайтах ФГБУ «Гидрометцентр России».

Апробация работы и публикации. Результаты диссертационной работы докладывались на 17 семинарах и конференциях и изложены в 18 публикациях, из них 7 – в периодических научных журналах, рекомендованных ВАК.

Обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается корректностью использованного математического аппарата и математических моделей, а также проведенной автором валидацией численной методики на больших архивах данных (объемом 10^6 – 10^8 пар прогностических и фактических значений). Достоверность полученных выводов также подтверждена тестированием прогнозов, вычисленных разработанной методикой в оперативном автоматизированном режиме.

Автореферат полностью и точно отражает содержание диссертации.

Замечания по диссертационной работе. В целом, работа оставляет положительное впечатление. Существенных замечаний нет. Может быть, следовало бы

уделить большее внимание вопросам выбора архитектур используемых нейронных сетей и алгоритмов их обучения.

Вывод. Диссертационная работа Быкова Филиппа Леонидовича «Постпроцессинг численных прогнозов приземных метеорологических параметров на основе нейросетевых методов» соответствует требованиям пунктов 9-11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы.

Сведения о ведущей организации. Федеральное государственное учреждение "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук". Адрес: Россия, 125047, г. Москва, Миусская пл., 4
Телефон: +7 (495) 250 79 71, электронная почта: info@keldysh.ru, Сайт: <https://keldysh.ru/>

Диссертационная работа Быкова Филиппа Леонидовича и отзыв на нее обсуждены и одобрены на заседании научного семинара имени К.И. Бабенко Федерального государственного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук" (руководитель семинара д.ф.-м.н. А.Л. Афендилов, ученый секретарь д.ф.-м.н. В.Т. Жуков), включающего научных сотрудников отдела «Прикладные задачи механики сплошных сред» и Математического отдела, 19 мая 2022 года, протокол № 4/2022.

Отзыв подготовили 26 мая 2022 г.:

Главный научный сотрудник Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша Российской академии наук», зав. отделом

доктор физико-математических наук

Юрий Николаевич Орлов

Россия, 125047, Москва, Миусская площадь, д.4. тел.: +7 (499) 978-13-14, факс: +7 (499) 972-07-37, эл. почта: office@keldysh.ru, Web-сайт организации: <http://www.keldysh.ru/>

Старший научный сотрудник Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша Российской академии наук»

кандидат физико-математических наук

02.06.2022 Михаил Александрович Бочев

Россия, 125047, Москва, Миусская площадь, д.4. тел.: +7(499) 978-13-14, факс: +7 (499) 972-07-37, эл. почта: office@keldysh.ru, Web-сайт организации: <http://www.keldysh.ru/>