

Оперативный гидродинамический краткосрочный прогноз погоды в пунктах

Гидродинамические методы прогноза погоды в нашей стране начали свою историю в 1919 г. в Главной геофизической обсерватории в отделе динамической метеорологии, возглавляемом А.А.Фридманом, а после его смерти Н.Е.Кочиным [20]. И.А.Кибель, работая в этом отделе, наряду с выполнением ряда оригинальных исследований по гидродинамике все больше внимания уделял применению законов и методов гидромеханики для прогноза погоды. В 1940 г. он впервые реализовал алгоритм предвычисления полей основных метеорологических величин на сутки вперед [19]. В 1943 г. И.А.Кибель возглавил Отдел динамической метеорологии в Центральном институте прогнозов, в котором получили интенсивное развитие работы по использованию гидродинамических методов прогноза погоды в ежедневной оперативной практике [14]. С.Л.Белоусов, которому выпала судьба воплощать в оперативную практику идеи И.А.Кибеля, писал в [2]: « Инициатором и основоположником этих работ был И.А.Кибель, исследования которого опирались на идеи и достижения отечественной школы динамической метеорологии, созданной трудами А.А.Фридмана, Н.Е.Кочина, Б.И.Извекова и других ученых с мировым именем. Талантливый ученый-новатор, автор основополагающих идей и принципов гидродинамического прогноза, он сплотил вокруг себя коллектив исследователей и увлек его своей эрудицией, дальновидностью, разнообразием и оригинальностью подходов и глубиной проникновения в различных направлениях новой проблемы, а также своей непоколебимой и бескомпромиссной убежденностью в перспективности избранных путей ее решения, включая идею прогноза погоды полностью на основе гидродинамических методов. Он же явился инициатором применения ЭВМ, быстро оценив их первостепенную роль и необходимость для практической реализации гидродинамических методов прогноза.

Благодаря безусловной практической направленности, характерной для работ И.А.Кибеля и его учеников, их идеи и результаты оказали решающее влияние на развитие теории и практики гидродинамического прогноза в нашей стране в течение всего последующего времени ».

Подробное изложение истории развития гидродинамических методов краткосрочного прогноза погоды представлено в многочисленных статьях и монографиях [1, 14, 15, 20, 22, 28, 30, 32, 35, 36, 41, 42, 43 и др.]. Данная статья посвящена развитию основных этапов исследований, оказавших определяющее влияние на создание в Гидрометцентре России современных оперативных технологий гидродинамического краткосрочного прогноза метеовеличин и характеристик погоды, их практическая эффективность, и обсуждаются проблемы и перспективы дальнейших исследований.

Развитие оперативных квазигеострофических моделей атмосферы

Проводимые в Главной геофизической обсерватории исследования по широкому кругу проблем теоретической метеорологии под руководством А.А.Фридмана и Н.Е.Кочина подготовили основу для создания и последующего развития гидродинамических методов прогноза метеовеличин. А.А.Фридман детально исследовал уравнение вихря скорости, получившее фундаментальное значение в современных методах прогноза погоды и указал на определяющую роль вертикальных движений в атмосфере для эволюции погодообразующих процессов синоптического масштаба [33].

Развитие идей А.А.Фридмана продолжили Н.Е.Кочин, Л.В.Келлер, И.А. Кибель, Е.Н.Блинова, А.А.Дородницын, Б.И.Извеков, М.И.Юдин и др. [1,2,14,28].

Разработанная и реализованная в 1940 г. И.А.Кибелем методика краткосрочного гидродинамического прогноза давления и температуры воздуха у поверхности Земли в

пунктах позволила применять ее в оперативной практике. Она положила начало широкому использованию прогностических моделей на основе квазигеострофической теории атмосферных процессов с целью прогноза метеорологических величин и характеристик погоды в различных прогностических центрах в нашей стране и за рубежом.

В связи с развитием вычислительной техники началось интенсивное развитие оперативных гидродинамических моделей в 50-60 гг. XX века. Наиболее эффективно в нашей стране эти работы велись в Гидрометцентре СССР (ныне Гидрометцентр России), Главной геофизической обсерватории, Вычислительном центре СО АН СССР и ряде других региональных центров.

В Гидрометцентре СССР с 1961 г в оперативной практике использовалась трехуровневая, а позднее пятиуровневая квазигеострофическая модель С.Л.Белоусова [12,28]. На основе прогноза полей геопотенциала и вертикальных движений по этой модели были разработаны и реализованы методики прогноза температуры, ветра, влажности, облачности и осадков. Потребности оперативной практики в повышении точности прогнозируемых величин и возрастающие возможности вычислительной техники усилили исследования по эффективному учету в моделях атмосферы процессов в пограничном слое, орографии, неадиабатических притоков тепла, процессов конденсации и испарения влаги, конвективных процессов, фронтов и других неблагоприятных метеорологических явлений [22,28]. Высокая эффективность достигнутых успехов в прогнозе характеристик погоды в пунктах обеспечили использование более совершенных прогностических моделей на основе полных уравнений гидродинамики [21,28,32,40,44].

Развитие оперативных моделей атмосферы с полными уравнениями гидродинамики

Применение в атмосферных моделях полных уравнений означает отказ от гипотезы квазигеострофичности крупномасштабных атмосферных движений, но сохранение условия квазистатичности. Для устойчивости счета в моделях на основе полных уравнений необходимо использовать малые шаги по времени и более производительные ЭВМ «второго поколения». В 70-х годах XX века развитие этих моделей и возможности вычислительной техники позволили начать применение этих моделей в оперативной практике в Гидрометцентре СССР и в Вычислительном центре Сибирского отделения Академии Наук (ВЦ СОАНО).

В Гидрометцентре СССР устойчивость счета при использовании шагов по времени порядка одного часа (по предложению И.А.Кибеля) достигалась благодаря тому, что разностные уравнения движения записывались неявно по линейным членам. Реализованные на основе этого подхода трехуровневая модель С.А.Бортникова и пятиуровневая – В.М.Кадышникова позволили прогнозировать кроме геопотенциала изобарических поверхностей также скорость и направление ветра и осадки [11,13]. Это были по современной терминологии региональные модели, продемонстрировавшие определенные преимущества моделей с полными уравнениями. В дальнейшем В.М.Кадышниковым и В.М.Лосевым была разработана региональная оперативная модель Гидрометцентра России [18]. На основе многолетнего опыта ее применения в оперативной практике В.М.Лосевым разработана региональная модель нового поколения для территории России с разрешением сетки 50 км и 50 уровней по вертикали [2]. Реализация этой модели с применением в оперативной практике в Гидрометцентре России стало возможной на многопроцессорной суперЭВМ КРЕЙ. Следуя потребностям оперативной практики, были разработаны и реализованы полушарные модели с полными уравнениями [28] (авторы Л.В.Беркович, Д.Я.Прессман, М.С.Фукс-Рабинович и С.О.Кричак).

В Гидрометцентре СССР получили преимущество модели, использующие эффективные вычислительные алгоритмы. Использование в модели Л.В.Берковича [4] экономичных вычислительных алгоритмов с применением «расштанной»

пространственно-временной сетки позволило эффективно проводить все расчеты и выдавать прогностическую продукцию в сжатые оперативные сроки.

Данная модель является основой нынешней оперативной неадиабатической многоуровневой полушарной модели краткосрочного прогноза [9,10]. Выходная продукция модели, в сочетании с расчетами по модели атмосферного пограничного слоя, используется для прогнозирования характеристик погоды в пунктах и для решения ряда прикладных задач.

В ВЦ СОАН также велись интенсивные работы по созданию методов прогноза погоды на основе полных уравнений. В ВЦ СОАН, а затем в Институте вычислительной математики Российской Академии наук (ИВМ РАН) модели на полных уравнениях развивались с использованием эффективных вычислительных алгоритмов на основе разработанного для метеорологических задач Г.И.Марчуком метода расщепления [25,26], который показал свою высокую эффективность в региональных моделях В.П.Дымникова и Г.Р.Контарева [17,27].

Развитие мезометеорологических моделей с целью локального прогноза погоды

Вслед за успешной практической реализацией моделей крупномасштабного прогноза на основе полных уравнений И.А.Кибель всю свою энергию и эрудицию направил на развитие методов гидродинамического мезомасштабного прогноза элементов погоды [23]. Пространственно-временные масштабы мезомасштабных процессов не допускают применения условия квазистатичности, заложенного в моделях на основе полных уравнений, т.к. мезомасштабные процессы развиваются на фоне крупномасштабных процессов. И.А.Кибель, отделив квазистационарный фон (синоптические процессы) и отклонения от него, порождаемые мезопроцессами, разработал один из возможных способов краткосрочного гидродинамического прогноза мезомасштабных движений [24]. Он теоретически обосновал возможность перехода от прогноза метеорологических полей к прогнозу погоды. И.А.Кибель до последних дней жизни активно работал над проблемами локального прогноза погоды и его безвременная кончина нанесла невосполнимый урон развитию исследований по мезометеорологии и внедрению методов локального гидродинамического прогноза в оперативную практику. Идеи И.А.Кибеля в Гидрометцентре России получили развитие в работах по моделированию процессов локального масштаба на основе теории глубокой конвекции [16]. В настоящее время коллективом, возглавляемым Д.Я.Прессманом, разработана и внедрена в оперативную практику негидростатическая модель для территории Москвы и Московской области размером 300×300 км² с шагом сетки 10 км на 15 уровнях в атмосфере и пяти - в почве [29]. При этом боковые граничные условия всех зависимых от времени переменных берутся из прогнозов по региональной модели Гидрометцентра России.

Гидродинамические модели локального прогноза развиваются в настоящее время в разных прогностических центрах и находят широкое применение, кроме прогнозов погоды, например, в задачах оценки антропогенного воздействия на окружающую среду.

Прогноз метеовеличин и характеристик погоды в пунктах

Прогностические модели атмосферы в нашей стране и за рубежом постоянно развиваются и совершенствуются на основе результатов отечественных и зарубежных научных исследований, все возрастающих возможностей вычислительной техники, позволяющих применять все более высокое горизонтальное и вертикальное разрешение и более точные параметризации физических процессов. В Гидрометцентре России использование уточненных методов описания турбулентных процессов в пограничном слое, радиационного и конденсационного теплообмена в атмосфере, процессов конвективного

облакообразования и ливневых осадков позволило разработать методы гидродинамического краткосрочного прогноза погоды и начать их практическое применение [5].

Использование гидродинамических методов в оперативной работе в Гидрометцентре России привело к созданию и внедрению в практику системы детализированного прогноза метеовеличин и характеристик погоды в пунктах на территории России и сопредельных стран [5].

Локальный гидродинамический прогноз погоды - это задача, требующая применения мезомасштабных моделей атмосферы. Именно такой подход к решению этой задачи, реализованный в Гидрометцентре применительно к прогнозу в масштабе Московской области, описан в [29]. Однако практические потребности оперативного прогноза погоды в пунктах на большой территории, включающей различные климатические зоны и десятки часовых поясов территории России, при современном уровне доступной вычислительной техники, возможностях систем наблюдения, сбора и обработки оперативной информации, а также наших знаний о физических параметрах атмосферы и подстилающей среды заставило применять другие подходы. Решение этой задачи оказывается реальным лишь в постановке, предусматривающей использование гидродинамической модели прогноза крупномасштабных метеорологических полей в сочетании с диагностическими расчетами на основе модели атмосферного пограничного слоя (АПС) и вычислительно-экономичных локально-адаптированных параметризаций для описания физических процессов меньших масштабов, в первую очередь - радиационных процессов, определяющих суточный ход приземной температуры воздуха. Используемая модель прогноза крупномасштабных полей является неадиабатической полушарной моделью в изобарической системе координат [6,9].

Модель АПС [7] широко апробирована на диагностических расчетах метеовеличин и турбулентных характеристик в пограничном слое атмосферы [8]. Данная модель в технологии прогноза погоды в пунктах обеспечивает вычисление турбулентных членов в уравнениях фоновой модели в точках сетки на уровнях, находящихся в пределах пограничного слоя. Она же обеспечивает расчет детализированных профилей скорости и направления ветра, температуры, влажности и характеристик атмосферной турбулентности в нижнем 2,0-км слое, а также фрикционной вертикальной скорости, которой в значительной степени определяется образование облачности и осадков [35]. Рассчитанные вертикальные профили в совокупности с результатами расчетов по крупномасштабной прогностической модели используются для прогнозирования приземных метеовеличин (скорости и направления ветра, его порывов, температуры и влажности), а также таких характеристик, как облачность и осадки.

Изменение приземной температуры воздуха, обусловленное суточным ходом радиации, рассчитывается по методике [31], модифицированной с учетом облачности и адвективных переменных [5].

Созданная в Гидрометцентре России оперативная технология на такой научно-методической основе прогноза погоды в пунктах обеспечивает предвычисление на сроки до 48-72 ч следующих метеовеличин и параметров погоды, включая их суточный ход с любой (например, трехчасовой) дискретностью по времени:

- приземные метеовеличины: атмосферное давление, температура, относительная влажность и ветер (скорость, направление и максимальная скорость при порывах);
- количество облачности трех ярусов (нижнего, среднего и верхнего);
- 12-часовые суммы осадков (в мм), или суммы осадков за любой другой интервал времени;
- время начала и окончания осадков;
- геопотенциал, температура, дефицит точки росы, скорость и направление ветра на изобарических поверхностях (до 100 гПа);
- вертикальные профили температуры, ветра, влажности и других турбулентных характеристик в нижнем 2,0-км слое.

Прогнозы рассчитываются для большого числа пунктов территории Евразии и в точках сетки ограниченной области для территории России. Для Москвы большинство названных параметров приземных характеристик погоды рассчитывается с детализацией по районам города и его ближайших окрестностей. Для оценки успешности детализированного прогноза и уточнения методики используется информация метеорологических станций (синоптическая сеть). В частности, учитывается информация семи метеостанций в Москве: Балчуг (центр города), Останкино, МГУ, ВВЦ (городские районы, различающиеся характером застройки, рельефом, наличием водоемов и другими особенностями местности и подстилающей поверхности), Измайлово, Немчиновка, Тушино (пригородные районы с большими пространствами, свободными от застройки). Подход, примененный для учета в модели АПС локальных особенностей подстилающей поверхности в различных районах, в частности - шероховатости, описан в [35].

Перечисленная выходная продукция используется в Гидрометцентре России и в других учреждениях для различных целей, включая предупреждения о неблагоприятных метеоусловиях, в том числе, в экологическом отношении. В целом, локальный гидродинамический прогноз названных метеовеличин и характеристик погоды на срок до 48-72 ч в настоящее время имеет наиболее высокую успешность среди всех прогнозов, в том числе синоптических прогнозов, использующих указанную информацию [5,6,38,39].

Высокая практическая эффективность оперативных гидродинамических прогнозов расчетов обеспечивается также при их реализации в технологии автоматизированного рабочего места синоптика (АРМС), действующей на базе ПЭВМ с доступом к обширному банку оперативных гидрометеорологических данных анализов и прогнозов в точках сетки, GRID и GRIB [3]. Технология АРМС позволяет синоптику быстро получать и использовать прогностические данные, освобождает от выполнения ряда расчетов и, благодаря этому, открывает более широкие возможности для использования синоптического интеллекта в прогностической работе.

Прогноз с использованием повышенного пространственного разрешения в ограниченной области

Практический опыт показывает, что недостаточная успешность прогнозов метеовеличин и характеристик погоды проявляется в случае быстрых изменений метеоусловий и при возникновении опасных явлений погоды. Одной из причин этого является недостаточное пространственное разрешение в гидродинамической модели, используемой для прогноза в свободной атмосфере, ибо указанные явления обычно являются мезомасштабными, и для их описания требуется шаг сетки порядка 10 км. Такое разрешение трудно достижимо в моделях фонового прогноза. Поэтому была разработана и реализована следующая система прогноза с использованием вложенных сеток.

В пределах области крупномасштабного (фонового) прогноза, рассчитываемого с помощью 16-уровневого исследовательского варианта модели с разрешением 75 км, выделяется внутренняя область размером 600×600 км², включающая территорию Московской и прилегающих областей, с шагом 7,5 км и 21 уровнем (от поверхности Земли до изобарической поверхности 700 гПа). В этой внутренней области расчет метеорологических полей производится по трехмерной модели АПС с использованием в качестве начальных данных у земной поверхности информации около 50 синоптических метеостанций, находящихся в этой области, а для остальных уровней эти данные находятся интерполяцией из узлов грубой сетки с шагом 75 км. Результатами расчетов на 21 уровне по модели АПС являются температура, влажность, составляющие скорости ветра и характеристики атмосферной турбулентности в точках сетки с шагом 7,5 км (81×81 точек). При таком высоком разрешении получаемая информация может использоваться как для прогноза метеовеличин и погоды в пунктах Московской и прилегающих областей, так и для различных районов больших городов. Для территории Москвы, например, приходится около

30 точек учащенной сетки, что вполне позволяет относить их к конкретным районам города, различающимся по характеристикам подстилающей поверхности, рельефу, типу местности и другим признакам.

Результаты успешности прогнозов с повышенным разрешением приведены в [6,38,39].

Проблемы и перспективы гидродинамических прогнозов погоды

Успешный опыт оперативного прогнозирования метеовеличин и характеристик погоды подтвердил эффективность подхода к решению этой проблемы на основе сочетания гидродинамического моделирования крупномасштабных фоновых процессов в свободной атмосфере с применением модели пограничного слоя и локально-адаптированных параметризаций физических процессов подсеточного масштаба. На основании этого опыта можно сформулировать ближайшие задачи и перспективы развития технологии краткосрочного прогноза погоды.

Наиболее актуальной для развития гидродинамического прогноза в моделях с высоким пространственным разрешением является разработка эффективных методов параметризации физических процессов. В первую очередь это относится к методам параметризации процессов образования облачности и осадков слоистых и конвективных форм путем учета фронтальных процессов в гидродинамических моделях [34].

С учетом того, что при использовании высокого разрешения, при котором физические процессы подсеточного масштаба оказываются модельно-разрешимыми, и, соответственно, требуют явного описания или применения иных параметризаций, адекватных этому разрешению, актуальным становится детализация представления радиационных процессов с целью повышения точности прогноза температуры в пограничном слое и в свободной атмосфере. Для этого, как и для прогноза осадков, необходимо уточнение методов прогноза влажности. Это может быть достигнуто совместным использованием атмосферной модели и модели гидрологического цикла поверхности суши с параметризованным представлением испарения почвенной влаги и выпавших осадков, поверхностного стока и диффузии влаги вглубь почвы [37].

Решение этих задач должно обеспечить гидродинамическим методам роль основных в краткосрочном прогнозе погоды.

Список литературы

1. Белоусов С.Л. Краткосрочный оперативный гидродинамический прогноз метеоэлементов в Гидрометцентре СССР // 50 лет Центру гидрометеорологических прогнозов. – Л.: Гидрометеоиздат. - 1979. – С. 17-35.
2. Белоусов С.Л., Беркович Л.В., Лосев В.М. Развитие гидродинамических методов краткосрочного прогноза погоды // 70 лет Гидрометцентру России. – СПб.: Гидрометеоиздат. - 1999. – С. 3-16.
3. Белоусов С.Л., Беркович Л.В., Юсупов Ю.И. Краткосрочный гидродинамический прогноз метеовеличин с использованием технологии автоматизированного рабочего места синоптика // Метеорология и гидрология. – 1994. - № 11. - С. 33-48.
4. Беркович Л.В. Шестиуровневая схема прогноза метеоэлементов по полным уравнениям для большой территории // Труды Гидрометцентра СССР. – 1972. - Вып. 100. - С. 108-116.
5. Беркович Л.В., Белоусов С.Л., Ткачева Ю.В. Краткосрочный гидродинамический прогноз метеорологических величин в пунктах на территории России и прилегающих стран // Метеорология и гидрология. – 1998. - № 4. - С. 18-31.

6. Беркович Л.В., Белоусов С.Л., Ткачева Ю.В., Калугина Г.Ю. Оперативный гидродинамический краткосрочный прогноз метеовеличин и характеристик погоды в пунктах // Метеорология и гидрология. – 2001. - № 2. - С. 14-26.
7. Беркович Л.В., Тарнопольский А.Г., Шнайдман В.А. Гидродинамическая модель атмосферного и океанического пограничных слоев // Метеорология и гидрология. – 1997. - № 7. - С. 40-52.
8. Беркович Л.В., Тарнопольский А.Г., Шнайдман В.А. Опыт восстановления внутренней структуры атмосферного пограничного слоя по оперативной метеорологической информации // Метеорология и гидрология. – 1998. - № 7. - С. 31-41.
9. Беркович Л.В., Ткачева Ю.В. Неадиабатическая полушарная модель атмосферы для прогноза метеовеличин на несколько суток // Труды Гидрометцентра СССР. – 1984. - Вып. 242. - С. 3-20.
10. Беркович Л.В., Ткачева Ю.В. Развитие неадиабатической полушарной модели атмосферы // Труды Гидрометцентра СССР. – 1985. - Вып. 277. - С. 3-29.
11. Бортников С.А. Построение многоуровневой прогностической модели на основе опыта оперативного краткосрочного прогноза по полным уравнениям для двух уровней атмосферы. - Труды Гидрометцентра СССР. - 1968. - Вып. 16. - С. 21-32.
12. Булеев Н.И., Марчук Г.И. О динамике крупномасштабных атмосферных процессов // Труды ИФА АН СССР. – 1958. - № 2. - С. 66-104.
13. Быков В.В., Бортников С.А., Кадышников В.М. Опыт оперативного краткосрочного прогноза погоды с помощью полных уравнений гидродинамики // Метеорология и гидрология. – 1971. - № 8. - С. 3-23.
14. Васильев А.А., Фролов А.В. Гидрометцентр России на пороге нового века // 70 лет Гидрометцентру России. – СПб.: Гидрометеиздат. - 1999. – С. 3-16.
15. Вейль И.Г. Гидродинамические схемы краткосрочного прогноза погоды // Труды ГМЦ. – 1973. - Вып. 124. - 119 с.
16. Вельтищев Н.Ф., Желнин А.А., Кисельникова В.З., Пекелис Е.М., Прессман Д.Я. Мезомасштабный прогноз погоды // Метеорология и гидрология. – 1982. - № 4. - С.5-15.
17. Дымников В.П., Контарев Г.Р. и др. Прогноз метеорологических элементов на ограниченной территории по полным уравнениям // Метеорология и гидрология. – 1975. - № 9. - с. 6-13.
18. Кадышников В.М., Кричак С.О., Лосев В.М. Пятнадцатиуровневая региональная модель атмосферы // Метеорология и гидрология. - 1989. - №10. - С. 23-31.
19. Кибель И.А. Приложение к метеорологии уравнений механики бароклинной жидкости // Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз. – 1940. - № 5. - С. 627-638.
20. Кибель И.А. Гидродинамика и прогноз погоды // Погода. – 1941. - № 6. (статья воспроизведена // Метеорология и гидрология. – 1994. - № 11. - С. 8-12).
21. Кибель И.А. О приспособлении движения воздуха к геострофическому // ДАН СССР. – 1955. - Т. 104. - № 1. - С. 60-63.
22. Кибель И.А. Введение в гидродинамические методы краткосрочного прогноза погоды - М.: Гостехиздат. – 1957. - 375 с.
23. Кибель И.А.. Некоторые новые задачи гидродинамического краткосрочного прогноза погоды // Труды ГМЦ. – 1964. - Вып. 3. - С. 3-18.
24. Кибель И.А.. Гидродинамический краткосрочный прогноз в задачах мезометеорологии // Труды ГМЦ. – 1970. - Вып. 48. - С. 3-33.
25. Марчук Г.И. Численные методы в прогнозе погоды - Л.: Гидрометеиздат. – 1967. - 353с.
26. Марчук Г.И. Численное решение задач динамики атмосферы и океана - Л.: Гидрометеиздат. – 1974. - 303 с.
27. Марчук Г.И., Контарев Г.Р., Ривин Г.С. Краткосрочный прогноз погоды по полным уравнениям на ограниченной территории // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1967. - Т. 3. - С. 1166-1178.

28. Очерки по истории гидрометеорологической службы России. Том 3. - СПб, Гидрометеоиздат. – 2001. - 270 с.
29. Пекелис Е.М., Прессман Д.Я., Кисельникова В.З., Дрофа О.В. Численные гидродинамические модели мезомасштабного прогноза Гидрометцентра России // 70 лет Гидрометцентру России. – СПб.: Гидрометеоиздат. – 1999. - С. 80-89.
30. Петросянц М.А. Пятьдесят лет центру гидрометеорологических прогнозов // 50 лет Центру гидрометеорологических прогнозов – Л.: Гидрометеоиздат. – 1979. - С. 3-16.
31. Серебряник Н.И. К прогнозу приземной температуры воздуха // Труды Гидрометцентра СССР. – 1986. - Вып. 275. - С.76-83.
32. Томпсон Ф. Анализ и предсказание погоды численными методами - М.: Издательство иностранной литературы. – 1962. - 239 с.
33. Фридман А.А. Опыт гидромеханики сжимаемой жидкости - Л.; М.: ОНТИ. – 1934. - 370 с.
34. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.В., Калугина Г.Ю. Субъективный и объективный анализы атмосферных фронтов. ч. II. Объективное выделение зон фронтов // Метеорология и гидрология. – 1998. - № 8. - С. 5-15.
35. Шнайдман В.А., Фоскарино О.В. Моделирование пограничного слоя и макротурбулентный обмен в атмосфере по данным ПГЭП - Л.: Гидрометеоиздат. – 1990. - 158 с.
36. Юдин М.И. Новые методы и проблемы краткосрочного прогноза погоды. - Л.: Гидрометеоиздат. – 1963. - 404 с.
37. Bel'chikov V.A., Berkovich L.V., Polunin A.J., Chemerenko Je.P. Incorporation of the land-surface hydrologic cycle into the atmospheric model. - Res.Act. in Atm. and Oceanic Modelling, Rep. No.27, 1998, 5.5-5.6.
38. Berkovich L.V., Belousov S.L., Kalugina G.Yu., Tkacheva J.V.– Developments in the short-term dynamical weather forecasting system at the Hydrometeorological Research Center of Russia. - Res. Act. in Atm. and Oceanic Modelling, 1999, No. 28, 5.7-5.8.
39. Berkovich L.V., Belousov S.L., Kalugina G.Yu., Tkacheva J.V. Short-range hydrodynamic forecasting of local weather patterns. – Res. Act. in Atm. and Oceanic Modelling, 2000, No. 30, 5.1-5.2.
40. Charney J.G. The use of the primitive equations of motion in numerical prediction. – “Tellus”, 1955, vol. 7, No. 1, p. 22-26.
41. Hinkelmann K. Ein numerisches Experiment mit den primitiven Gleichungen. The atmosphere and see in motion. Rossby Memorial volume. The Rockefeller Inst. Pres. New York, 1959, p. 486-500.
42. Phillips N.A. Numerical integration of the primitive equations on the hemisphere. – “Monthly Weather Review”, 1959, vol. 87, No. 9, p. 333-345.
43. Shuman F.G. and Hovermale J.B. An operational six layer primitive equation model. – “J. Appl. Met.”, 1968, No. 7, p.525-547.
44. Smagorinsky J. On the numerical integration of the primitive equations of motion for baroclinic flow in a closed region. – “Mon.Wea. Rev.”, 1958, vol. 86, No. 12, p. 457-466.