

*В.И. Акселевич*

### МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН С ПОМОЩЬЮ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

*V.I. Akselevich*

### METHOD OF FORECASTING METEOROLOGICAL VARIABLES USING INFORMATION TECHNOLOGY

*В статье рассматривается методика прогнозирования метеорологических величин с использованием вычислительной техники. Описываются геоинформационные методы и технологии. Приводятся и обсуждаются результаты прогнозов метеовеличин у поверхности земли и на высотах. Сравниваются ошибки прогнозов различными методами. Формулируется алгоритм прогнозирования метеовеличин с помощью информационных технологий.*

*Ключевые слова: геоинформационные системы, гидрометеорологическая информация, геоэкологический мониторинг, прогноз, метеорологические величины, вычислительная техника.*

*The article discusses the technique of forecasting meteorological variables using computer technology. Describes methods and GIS technology. The results of forecasts meteorological values at the surface and at heights. Forecast errors compared different methods. Formulated meteorological values prediction algorithm using information technology.*

*Key words: GIS, hydro-meteorological information, geo-ecological monitoring, forecast, meteorological variables, computing.*

Любая человеческая деятельность, в той или иной степени зависит от состояния гидрометеорологических условий. Сегодня человек только начинает существенно влиять на него, поэтому главной задачей является максимально точное прогнозирование погоды.

В ходе проведенного нами исследования были определены особенности представления гидрометеорологической информации, выработаны методика разработки геоинформационных технологий гидрометеорологического обеспечения и геоэкологического мониторинга, а также методика использования исходных материалов для разработки прогнозов погоды различного назначения [2].

Методика прогнозирования метеорологических величин с помощью информационных технологий включает в себя привлечение внимания лиц, принимающих решения (ЛПР) к учету состояния окружающей среды уже на этапе принятия решения; использование в качестве объективных показателей для оценки достоверности моделей прогноза приземного давления и прогноза температуры на уровне 850 гПа в заданном пункте; корректировку результатов численного моделирования с помощью статистического метода; использование мезо- и микромасштабного гидродинамического моделирования, в том числе с учетом возможной экстраполяции и интерполяции

исходных данных в узлы соответствующей сетки; комплексирование различных подходов к сверхкраткосрочному прогнозу [7].

Определено рациональное соотношение общих и частных геоинформационных методов поддержки принятия решений, обеспечивающее: согласованную обработку разнородной геоинформации; единый геоструктурный анализ ситуации; построение универсальных пространств-оценок метеообстановки; представление руководству геоинформации в той последовательности, составе и форме, как это необходимо ему на этапах управления.

Была уточнена методика комплексного анализа погоды за счет использования новых возможностей современных информационных технологий и оригинальных подходов к оценке состояния атмосферы на основе сопоставления различных метеорологических параметров. Также разработано методическое обеспечение прогноза различных метеорологических величин.

Конкретных реализаций геоинформационных методов может быть очень много — в зависимости от решаемых задач [3, 8]. Поэтому рассмотрим только некоторые методики в качестве иллюстрирующих примеров.

В качестве примера возьмем задачу заправки самолетов топливом в воздухе. На выполнение этой задачи будут оказывать влияние в первую очередь ветер на высотах, количество, форма и высота слоев облачности, болтанка, условия полетов в облаках. Соответственно к слайду с «географическим» слоем нужно добавить, используя меню «аэрология» системы ГИС Метео, траектории, струйные течения и вертикальные скорости. Технологические средства позволяют привлечь к анализу информацию в кодах GRID и GRIB, произвести генерацию вертикальных скоростей и осуществить прогноз ветра, облачности и болтанки. В современных условиях ГИС Метео позволяет получить такой прогноз с заблаговременностью 72 ч и 6-ти или 12-ти часовой дискретностью по времени. В целом, можно подобрать для каждого вида задач набор слайдов и технологических средств и записать соответствующие варианты в память системы в качестве образцовых [8].

В табл. 1 приведены вероятности ошибок величиной 1, 2, 3, 4, 5 и более 5 гПа при прогнозе приземного давления в заданной точке (Санкт-Петербург) с различной заблаговременностью и с помощью различных моделей.

В результате можно заключить, что наиболее достоверные результаты получаются при заблаговременности 24 ч.

С вероятностью 60 % ошибка прогноза давления по модели MRF не превышает 3 гПа, а по модели «Оффенбах» вероятность попадания ошибки в указанный интервал достигает 74 %.

Здесь наилучшие результаты получены для заблаговременности 96 ч, но это может объясняться недостаточно репрезентативным рядом данных (число исследовавшихся вариантов прогноза составляло всего 15–20 случаев), использованных для получения средней ошибки по данному ряду.

В целом ошибка не превышает 5 гПа с заблаговременностью 24 ч в 90 % случаев (Оффенбах), 48 ч в 57 % случаев (Оффенбах), 72 ч в 86 % случаев (ECMWF).

Кроме таблицы вероятностей ошибок заданной величины для получения исправляющего коэффициента весьма полезно знать количество случаев, когда прогностическое значение оказалось выше фактического и наоборот.

Таблица 1

Вероятности ошибок прогноза давления для СПб в 1, 2, 3, 4, 5 и более 5 гПа по различным моделям и заблаговременности

Модель	Заблаговременность, ч	1 гПа, %	2 гПа, %	3 гПа, %	4 гПа, %	5 гПа, %	> 5гПа, %
MRF	24	20	40	60	66	70	30
	48	20	30	32	36	40	60
	72	9	18	27	36	45	55
	96			20	30	60	40
	120		15	23	27	31	69
	144	9	10	15	17	18	82
	168		9	14	16	18	82
	192		17	19	25	33	67
	216		14	19	21	29	71
	240	18	27	36	50	54	46
Оффенбах	24	40	60	74	80	90	10
	48	43	49	53	56	57	43
	72	14	16	29	34	57	43
	96	10	30	40	60	70	30
	120						100
	144				13	25	75
ECMWF	72	10	29	57	70	86	14
	96	29	43	50	60	71	29
	120		29	30	35	43%	57
	144		13	25	27	38	62
UKMO	24			33	34	35	65
	48				31	33	67
	72	33	35	36	37	38	62
	96	66	69	84	100	100	0
	120		33	36	51	100	0
	144			33	66	100	0

В табл. 2 представлено соотношение количества ошибок завышения и занижения давления для разных моделей и различной заблаговременности. Все без исключения модели сначала с увеличением заблаговременности увеличивают число случаев занижения результатов. Но с определенного времени, число занижения результатов прогнозов достигает максимума и начинается обратный процесс. При этом для модели MRF, представленной наибольшей заблаговременностью, данный процесс имеет колебательный характер и после уменьшения количества случаев занижения результатов снова наблюдается их увеличение при дальнейшем увеличении заблаговременности.

Таблица 2

**Соотношение ошибок занижения и завышения давления для СПБ  
по различным моделям и различной заблаговременности**

Модель	Заблаговременность, ч	Завышение, %	Занижение, %
Оффенбах	24	60	40
	48	57	43
	72	57	43
	96	50	50
	120		100
	144	13	87
MRF	24	57	43
	48	33	67
	72	29	71
	96	17	83
	120	56	44
	144	67	33
	168	67	33
	192	60	40
	216	50	50
ECMWF	72	60	40
	96	40	60
	120	29	71
	144	63	37
UKMO	24	66	34
	48	50	50
	72	34	66
	96	34	66
	120	66	34
	144	66	34

Существенное внимание уделяется прогнозу температуры. Одним из наиболее распространенных в практической оперативной работе способом прогноза температуры в последнее время стал прогноз с использованием положения прогностических изотерм на карте АТ-850 [1].

Оценка качества прогнозирования предусматривает исследование величины и изменчивости отклонения прогностической температуры на уровне 850 гПа ( $T_{\text{пр850}}$ ) от фактически наблюдавшейся температуры у поверхности Земли ( $T_{\text{фз}}$ ).

На рис. 1 приведены математические ожидания отклонения  $T_{\text{фз}}$  от  $T_{\text{пр850}}$  ( $\Delta T$ ) для моделей MRF и UKMO. Анализ этого графика показывает, что  $\Delta T$  варьирует в пределах

от 3 до 6 градусов в зависимости от заблаговременности. Пилообразный вид исследуемых кривых, по-видимому связан с особенностями вычислительного алгоритма моделей. Судя по данному рисунку колебания величины отклонения с увеличением заблаговременности прогноза затухают.

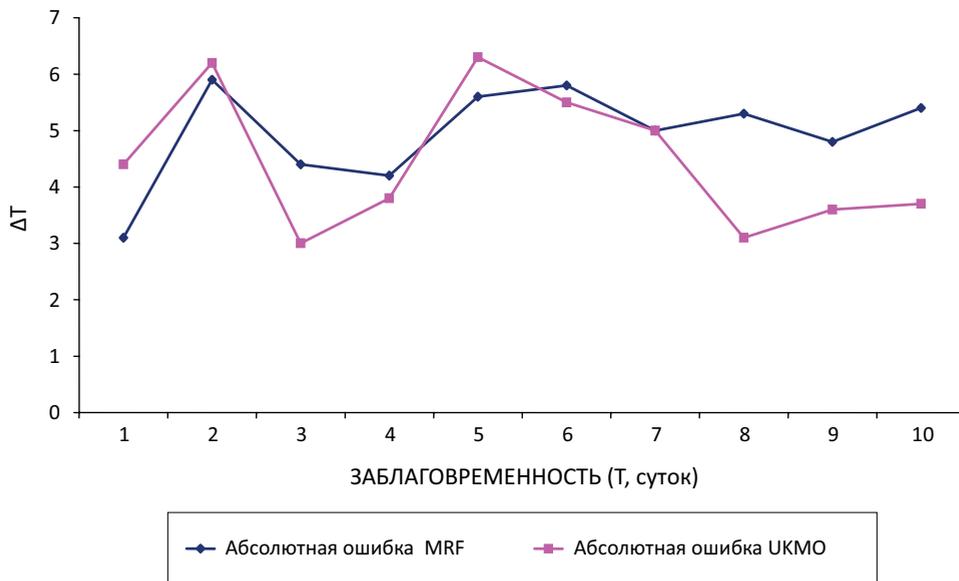


Рис. 1. График математического ожидания отклонения температуры у Земли от прогностической температуры на уровне 850 гПа ( $\Delta T$ )

Для заблаговременности 1, 2, 5 суток меньшие отклонения характерны для модели MRF, в остальных случаях UKMO.

Рис. 2 показывает ход СКО для отклонений температуры по обеим моделям. Меньший разброс характерен для модели MRF с заблаговременностью 1–4 и 9 суток, а при других заблаговременностях для UKMO.

Основой для построения математической модели могут быть наблюдения за изменением количественных характеристик исследуемых параметров либо сравнение ряда расчетов. Существующие статистические методы прогнозирования тесно привязаны к способам измерения прогнозируемых параметров и требуемым исходным данным.

Поэтому для решения поставленных задач предлагается использовать методы, разрабатываемые в рамках теории самоорганизации математических моделей. Сердцевиной этой теории является метод группового учета аргументов (МГУА) [4, 5, 6], который позволяет по ограниченной выборке экспериментальных данных синтезировать математическую модель в условиях частичной или полной неопределенности знаний о структуре моделируемого процесса и свойствах шумов в исходных данных.

С помощью комплексного метода, включающего модифицированный метод группового учета аргументов и оптимальную экстраполяцию, для осуществления пространственного прогноза высотных профилей параметров ветра рассчитывались ошибки восстановления характеристик ветра для Санкт-Петербурга по данным за июль 2000 г. и январь 2001 г. Приведем в качестве примера прогноз вертикального распределения (восстановления) зонального и меридионального ветра на уровне 300 гПа с помощью МГУА за 12 ч СГВ 04.01.2001.

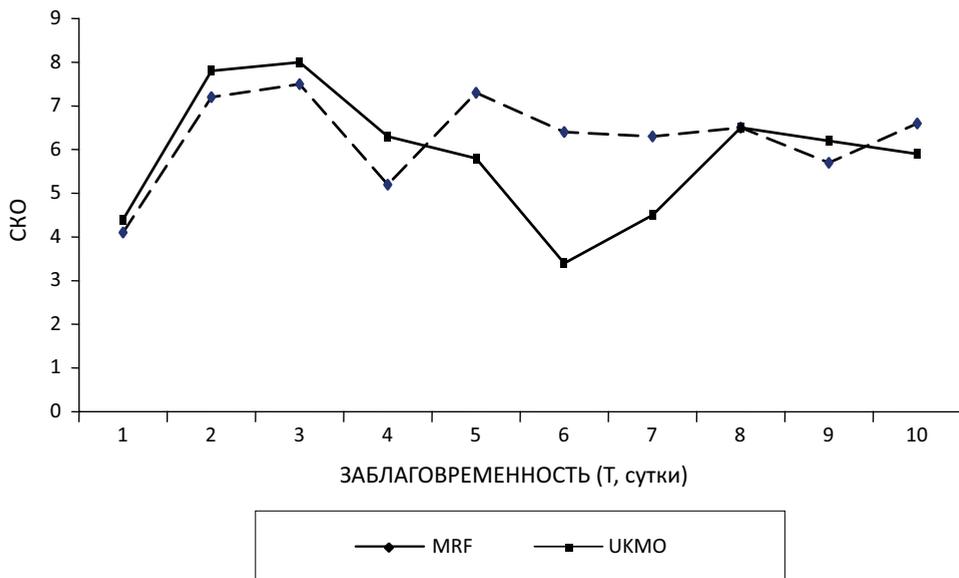


Рис. 2. Изменение СКО разности фактической температуры у Земли и прогностической температуры на уровне 850 гПа в зависимости от заблаговременности прогноза для различных моделей

Исходными данными послужили части А телеграмм за 1–4 января в коде КН-04. При этом восстанавливался уровень 300 гПа по взятым за 7 сроков полным профилям (от Земли до 300 гПа) и одному усеченному в момент прогноза (от Земли до 400 гПа). Восьмая телеграмма использовалась для построения усеченного профиля и проверки результатов прогноза на уровне 300 гПа.

На основании этих телеграмм был осуществлен пересчет векторов ветра на зональную и меридиональную составляющие. Результаты пересчета по всем 8 профилям (7 полных и восьмой неполный для уровня 300 гПа) представлены в табл. 3.

Наличие минусов связано с тем, что при преобразовании значение  $V_y$  будет положительным при метеорологическом направлении ветра (откуда движется воздух) от 90 до 270 градусов, а значение  $V_x$  — от 180 до 360 градусов. В ходе дальнейшего расчета с использованием алгоритма МГУА получили результаты, представленные в табл. 4.

Таблица 3

Зональная ( $V_x$ ) и меридиональная ( $V_y$ ) составляющие ветра над Санкт-Петербургом в январе 2001 г.

Дата, срок	Вид составляющей	Земля	850 гПа	700 гПа	500 гПа	400 гПа	300 гПа
1.01-00	$V_x$	-0,3	5,6	17,0	30,4	40,2	31,0
1.01-00	$V_y$	0,9	2,0	-1,5	-5,3	-7,0	-1,6
1.01-12	$V_x$	-2,9	-1,7	8,8	28,4	36,0	38,0
1.01-12	$V_y$	-0,5	3,6	1,5	4,9	3,2	0,0
2.01-00	$V_x$	-2,0	-3,8	4,6	10,8	23,5	30,9
2.01-00	$V_y$	-0,3	4,6	10,0	15,6	8,5	14,3
2.01-12	$V_x$	-2,7	1,5	0,0	7,1	10,1	22,4
2.01-12	$V_y$	2,0	8,8	9,0	15,5	21,8	26,6
3.01-00	$V_x$	-2,0	-10,3	-12,1	-8,2	-7,0	-5,3
3.01-00	$V_y$	0,0	3,7	12,1	22,6	26,2	30,4
3.01-12	$V_x$	3,5	16,7	17,0	3,9	-3,4	-6,1
3.01-12	$V_y$	-2,0	-1,2	-1,5	14,6	19,6	16,9
4.01-00	$V_x$	3,0	10,4	11,8	14,8	18,0	18,9
4.01-00	$V_y$	0,0	6,0	5,5	8,5	12,5	13,1
4.01-12	$V_x$	2,8	13,0	14,0	18,0	19,6	
4.01-12	$V_y$	1,0	0,0	1,3	1,6	3,4	

Таблица 4

Результаты прогноза (восстановления) методом МГУА зональной ( $V_x$ ) и меридиональной ( $V_y$ ) компонент ветра над Санкт-Петербургом на уровне 300 гПа для срока 12 ч (СГВ) 04.01.2001 и их реально наблюдавшиеся значения

	Прогноз, м/с	Фактически наблюдалось, м/с
Зональная компонента	23,1	26,5
Меридиональная компонента	2,1	4,6

Для статистической оценки успешности метода прогноза (восстановления) было произведено 40 вариантов расчета (по 20 для зимы и лета с учетом использования для восстановления одиннадцатого профиля десяти предыдущих). Обобщенные результаты экспериментальной оценки приведены в табл. 5.

Величины ошибок свидетельствуют о существенной сложности прогнозирования (восстановления) параметров ветра, что обуславливает необходимость более частого зондирования состояния атмосферы, чем в стандартные сроки радиозондирования через 12 ч.

По тем же исходным данным, что и приведенные в примере расчета по методу МГУА был осуществлен прогноз параметров ветра методом множественной или оптимальной экстраполяции. Результаты прогноза представлены в табл. 6.

Таблица 5

Среднеквадратические отклонения ( $\sigma$ ), абсолютные ( $d$ ) и относительные ( $\Theta$ ) ошибки восстановления зональной и меридиональной компонент скорости ветра

Уровень, гПа	Зональный ветер			Меридиональный ветер		
	$d$ , м/с	$\Theta$ , %	$\sigma$ , м/с	$d$ , м/с	$\Theta$ , %	$\sigma$ , м/с
Санкт-Петербург, зима						
850	2,5	50	6,8	6,1	79	7,7
700	1,9	46	8,3	5,1	53	9,6
500	2,3	62	11,3	6,9	53	13,0
400	3,5	59	13,6	5,8	37	15,6
300	2,5	91	14,7	5,8	34	16,9
Санкт-Петербург, лето						
850	2,1	45	4,7	4,1	73	5,6
700	2,5	39	6,4	3,6	54	5,6
500	2,5	27	9,1	3,8	42	9,1
400	2,3	20	11,5	5,3	47	11,3
300	2,5	17	14,6	5,7	41	14,0

Таблица 6

Результаты прогноза методом оптимальной экстраполяции зональной ( $V_x$ ) и меридиональной ( $V_y$ ) компонент ветра над Санкт-Петербургом на уровне 300 гПа для срока 12 ч (СГВ) 04.01.2001 и их реально наблюдавшиеся значения

	Прогноз, м/с	Фактически наблюдалось, м/с
Зональная компонента	22,4	26,5
Меридиональная компонента	7,2	4,6

После вычисления восстановленных значений на одном уровне можно переходить к следующему.

При длительной работе в одном районе целесообразно оценить отклонения восстановленных значений от фактических и ряд статистических характеристик, связанных с ними, для выявления и учета систематических ошибок и для настройки алгоритма.

Прогноз для 12 ч (СГВ) 04.01.2001 по данным за 1–4 января 2001 г., осуществленный с помощью метода оптимального восстановления, дал следующие результаты:

Таблица 7

Результаты прогноза методом оптимального восстановления зональной ( $V_x$ ) и меридиональной ( $V_y$ ) компонент ветра над Санкт-Петербургом на уровне 300 гПа для срока 12 ч (СГВ) 04.01.2001 и их реально наблюдавшиеся значения

	Прогноз, м/с	Фактически наблюдалось, м/с
Зональная компонента	21,3	26,5
Меридиональная компонента	5,5	4,6

Процедура может повторяться для различных уровней и выполняться с использованием итерационного алгоритма. Пример прогноза с помощью метода полиномиальной экстраполяции по тем же исходным данным (1–4 января 2001 г. для Санкт-Петербурга) дал итоги, представленные в табл. 8.

Таблица 8

Результаты прогноза методом полиномиальной аппроксимации зональной ( $V_x$ ) и меридиональной ( $V_y$ ) компонент ветра над Санкт-Петербургом на уровне 300 гПа для срока 12 ч (СГВ) 04.01.2001 и их реально наблюдавшиеся значения

	Прогноз, м/с	Фактически наблюдалось, м/с
Зональная компонента	29,8	26,5
Меридиональная компонента	1,9	4,6

На рис. 3 и 4 представлены обобщенные по 40 случаям результаты восстановления (относительные ошибки) вертикальных профилей зональной и меридиональной составляющих ветра всеми 4 способами. В качестве натуральных данных для решения задачи восстановления вертикальных профилей ветра были взяты 62 профиля за июль 2000 г. и январь 2001 г. для города Санкт-Петербурга.

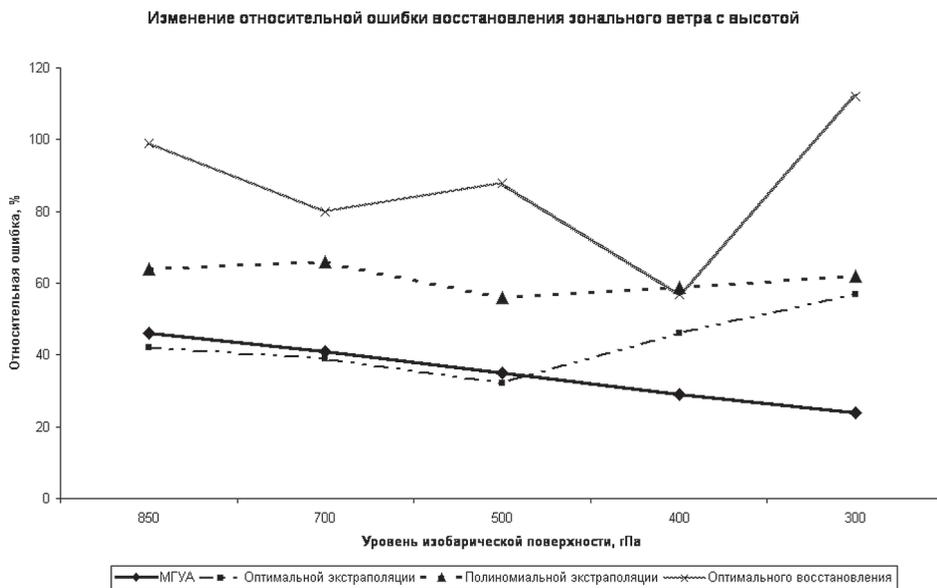


Рис. 3. Результаты экспериментальной отработки восстановления профиля зонального ветра различными методами

Как видно из рис. 3 для зональной составляющей наилучшие результаты в основном характерны для метода МГУА, хотя в слое 850–500 гПа несколько меньшая

относительная ошибка при экспериментальной отработке на материале января 2001 г. (Санкт-Петербург) наблюдалась при использовании метода оптимальной экстраполяции.

Меридиональный ветер (рис. 4) восстанавливается значительно хуже, что характерно почти для всего Северного полушария. При этом только на уровне изобарической поверхности 400 гПа методы оптимальной экстраполяции и даже полиномиальной экстраполяции дали несколько меньшую ошибку, чем МГУА.

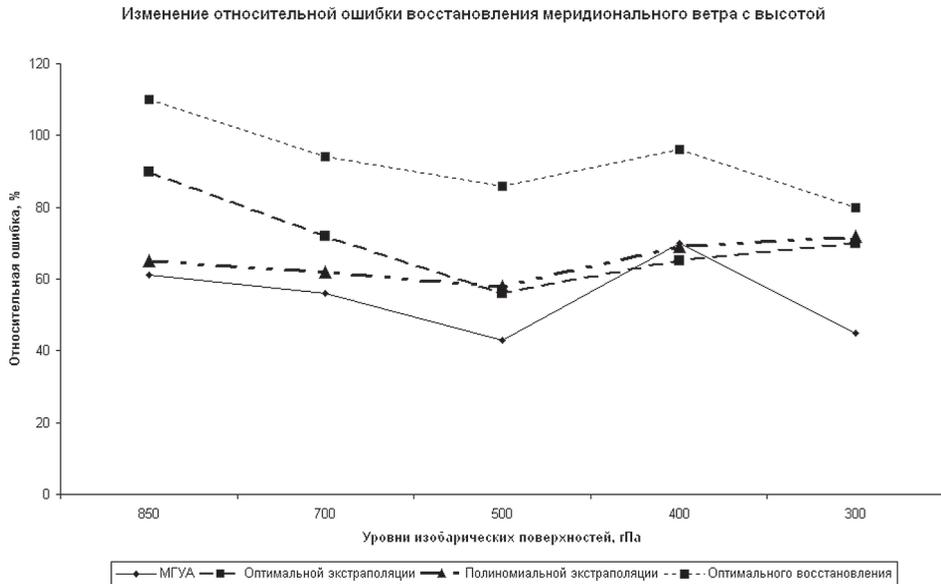


Рис. 4. Результаты восстановления (относительные ошибки) вертикальных профилей меридиональной составляющих ветра

Таким образом, использование вычислительной техники для решения задач прогноза состояния атмосферы позволяет повысить точность прогнозов и улучшить наглядность представления прогностической информации.

Процесс использования вычислительной техники и информационных технологий для прогнозирования погоды и снабжения руководства фактической информацией сводится к следующему алгоритму:

1. Сбор исходной информации, начальных условий для осуществления работы моделей, дополнительной информации по мере усвоения данных наблюдений за погодой.
2. Модель выдает результаты в виде расчетных значений метеорологических параметров в узлах сетки.
3. Результаты расчета кодируются специальным образом и передаются в виде телеграмм различным потребителям прогностической продукции.
4. Отображение полученных результатов в виде, удобном для представления гидрометеоинформации потребителям.

### Литература

1. *Акселевич В.И., Бортяков А.В.* Методика и предварительные результаты использования современных информационных технологий для разработки оперативных прогнозов погоды. // Тезисы докладов 2 Всероссийской научной конференции «Проблемы и перспективы гидрометеорологических прогнозов» 17–20 января 2000 г. — М.: Триада, 2000, с. 78–79.
2. *Акселевич В.И., Мазуров Г.И.* Использование вычислительной техники и информационных технологий в науках о Земле. — СПб.: Инфо-Да, 2010. — 301 с.
3. *Бескид П.П., Миранков В.А.* Теоретическое обоснование выбора архитектуры геоинформационных систем освещения обстановки. // Учёные записки РГГМУ, 2014, № 36, с. 177–182.
4. *Ивахненко А.Г.* Переборные методы моделирования и кластеризации. // Автоматика, 1988, № 4, с. 3–16.
5. *Комаров В.С., Акселевич В.И., Креминский А.В.* Модифицированный метод группового учета аргументов как эффективный метод статистического оценивания характеристик свободной атмосферы в условиях информационной неопределенности. // Оптика атмосферы и океана, 1994, т. 7, № 2, с. 231–237.
6. *Креминский А.В.* Применение метода группового учета аргументов для решения задач восстановления, прогноза и объективного анализа полей температуры и ветра. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. — СПб., 1997. — 148 с.
7. *Мазуров Г.И., Акселевич В.И., Биденко С.И.* Облачные мезонеоднородности и возможности управления их эволюцией в целях создания локальных благоприятных условий погоды. — СПб.: «Технолит», 2013. — 191 с.
8. *Черепова М.В., Смышляев С.П., Мостаманди С.В.* Диагностическое и прогностическое моделирование распределения малых газовых составляющих над территорией Российской Федерации. // Учёные записки РГГМУ, 2015, № 38, с. 78–86.