

Доклад на конференции, посвященной Дню белорусской науки 25.01.2023 г.

Оцабрик Руслан Викторович

начальник отдела численного моделирования прогнозов
службы программного обеспечения Белгидромета

О повышении качества гидрометеорологических прогнозов и обнаружения опасных гидрометеорологических явлений

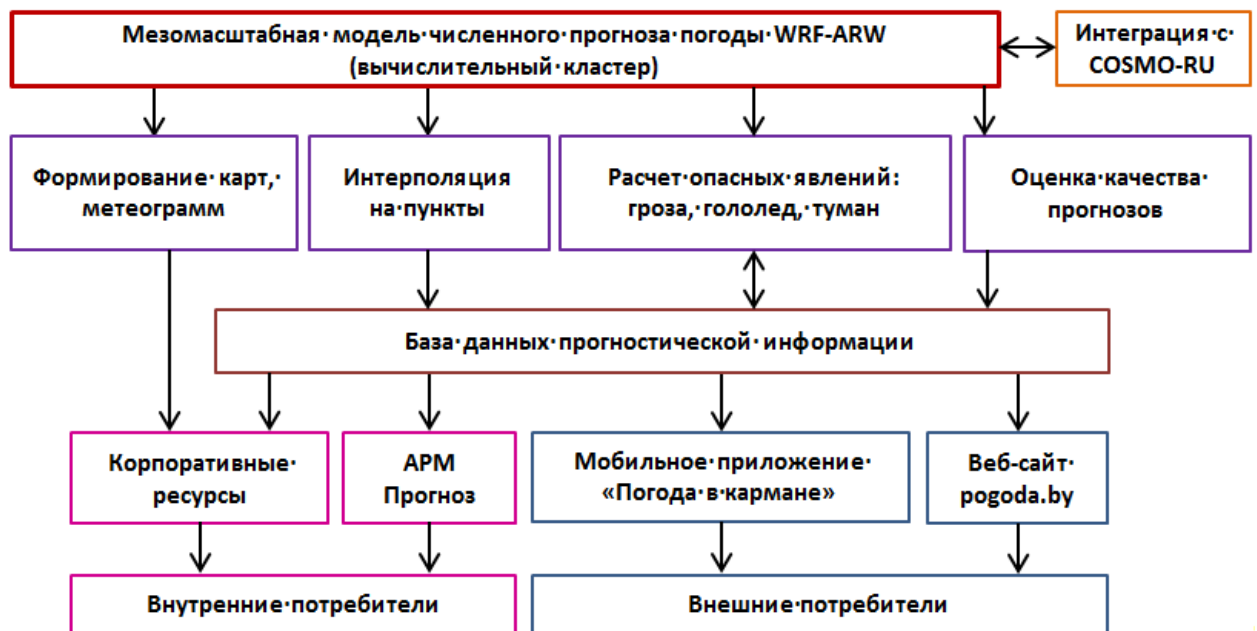
В основе современных прогнозов погоды и опасных погодных явлений в наше время лежит численное моделирование погоды. Численный прогноз погоды – это прогноз, рассчитанный с использованием последних достижений в области математического моделирования и численных методов с использованием высокопроизводительных вычислительных кластеров (суперкомпьютеров), имеющих на своем борту сотни, а то и тысячи процессоров и терабайты оперативной памяти.

Можно выделить несколько факторов, определяющих качество численного прогноза погоды:

- точность вычисления прогнозов погоды;
- полнота прогностической информации;
- своевременность расчета прогнозов погоды;
- наличие программно-технической инфраструктуры для расчета численного прогноза и доставки его потребителям;
- надежность функционирования этой инфраструктуры;
- проведение исследований в области численного моделирования, внедрение новых и все более совершенных технологий.

Безусловно, самыми важными факторами являются точность и полнота численного прогноза погоды. Однако эти факторы не единственные – своевременность получения и доступность прогноза потребителям возможны только при наличии соответствующей программно-технической инфраструктуры, которая, в свою очередь, должна обладать высокой надежностью и обеспечивать бесперебойную работу. В Белгидромете такая инфраструктура создана и успешно эксплуатируется.

Рисунок 1 - Программная инфраструктура численного прогноза погоды



В ее основе находится модель численного прогноза погоды – комплекс программ, собственно выполняющих работу по прогнозированию – вычислению прогноза погоды по необходимым параметрам с определенной заблаговременностью (т.е. горизонтом прогнозирования, например, на 48 часов вперед). Прогнозирование осуществляется путем решения сложных систем математических уравнений, т.н. негидростатическое моделирование. После расчетов формируется набор необходимых карт, метеограмм, аэрологических диаграмм, представляющих прогноз погоды в графическом, визуальном формате по той территории, для которой рассчитывается прогноз. На основе полученных данных выполняется анализ конвективных атмосферных процессов и прогнозирование таких опасных явлений, как гроза, гололед, туман. Результаты расчетов сохраняются в базе данных, после чего численный прогноз погоды становится доступен синоптикам (внутренним потребителям) для дальнейшего анализа с применением специализированного программного обеспечения – автоматизированного рабочего места синоптика «Прогноз». Для доставки прогноза внешним потребителям реализованы такие сервисы как сайт pogoda.by и мобильное приложение «Погода в кармане».

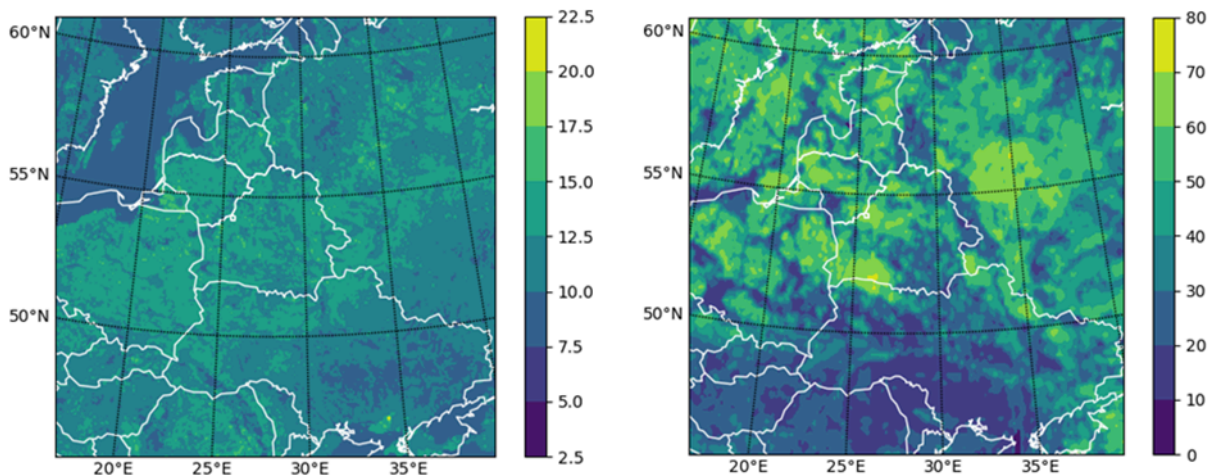
В Белгидромете ведется систематическая работа по повышению точности прогнозов. В настоящее время совместно с Институтом природопользования НАН Беларуси выполняется научно-исследовательская работа, задачей которой является разработка автоматизированной системы контроля, подготовки и ассимиляции геофизических и метеорологических данных высокого пространственно-временного разрешения для региональной численной модели прогноза погоды WRF-ARW. Целью работы является повышение оправдываемости краткосрочных прогнозов численной

мезомасштабной модели WRF-ARW для территории Беларуси за счет использования новых геофизических и метеорологических данных высокого пространственно-временного разрешения, получаемых на базе спутниковых систем дистанционного зондирования и наземных температурно-ветровых профилемеров.

В основе работы лежит использование совместно с моделью численного прогноза погоды WRF-ARW обновленных параметров землепользования и биофизических параметров подстилающей поверхности, полученных в результате спутникового дистанционного зондирования земли.

Примером таких данных о земной поверхности может служить распределение альбедо - характеристика диффузной отражательной способности поверхности. Распределение альбедо для традиционных данных представлено на левом изображении, а для обновленных – на правом.

Рисунок 2 - Распределение альбедо в январе



Одна из задач проводимой научно-исследовательской работы - выяснить, насколько использование таких обновленных данных повлияет на качество прогноза. Для оценки использовались два подхода, один из которых статистический, а второй основан на определении оправдываемости прогнозов по ТКП (ТКП - технический кодекс устоявшейся практики).

Для выполнения работ был проведен комплекс мероприятий:

- созданы четыре технологические схемы на основе модели WRF-ARW с обновленными параметрами землепользования и биофизическими параметрами подстилающей поверхности;
- выполнена оптимизация системного программного обеспечения на вычислительном кластере для обеспечения одновременного счета рабочих и экспериментальных технологических схем;
- выполнен счет прогноза погоды за разные периоды года;

- выполнена статистическая оценка полученных результатов и расчет оправдываемости по ТКП.

Для проведения экспериментов и расчетов были созданы следующие технологические схемы (модели):

WRF-EXP 15 (шаг 15 км, данные подстилающей поверхности с ежедневным обновлением);

WRF-EXP 3 (вложенный домен, шаг 3 км, данные подстилающей поверхности с ежедневным обновлением);

WRF-GEO (шаг 3 км, обновленные данные подстилающей поверхности за длительный период);

WRF-OPER (шаг 3 км, данные подстилающей поверхности с ежедневным обновлением).

Оценка качества прогноза проводилась для различных показателей, среди которых приземная температура, температура на уровнях 850, 700, 500 гПа, осадки и приземное давление. Полученные статистические оценки сравнивались с аналогичными оценками для рабочих схем WRF_15 (15 км) и WRF_3 (3 км), использующих традиционную базу данных подстилающей поверхности. Сравнение производилось между схемами с одинаковым шагом. На следующих рисунках представлены результаты для периодов с наибольшей изменчивостью температуры, а также наличием осадков в виде выпавшего снега. Улучшение статистического показателя представлено зеленым цветом, а ухудшение красным.

**Рисунок 3 - Сравнительная оценка качества прогноза:
приземная температура 23-31 января 2022 г., заблаговременность 30
часов**

Модель	Шаг	Средняя вероятность ошибок, %			Средняя ошибка	Ср. абс. ошибка	Ср. квад. ошибка	Коэф. корр.
		0-2°	2-4°	>4°				
WRF_3	3 км	33	44	22	-2.8	3.18	4.46	0.34
WRF_15	15 км	33	56	11	-2.73	3.06	4.41	0.43
WRF_EXP_15	15 км	89 (+56%)	11 (-45%)	0 (-11%)	-0.87 (-1.86)	1.56 (-1.5)	2.2 (-2.21)	0.54 (+0.11)
WRF_EXP_3	3 км	67 (+24%)	33 (-11%)	0 (-22%)	-0.86 (-1.94)	1.67 (-1.51)	2.32 (-2.14)	0.52 (+0.18)
WRF_GEO	3 км	67 (+24%)	22 (-22%)	11 (-11%)	-1.4 (-1.4)	1.84 (-1.34)	2.86 (-1.6)	0.5 (+0.16)
WRF_OPER	3 км	67 (+24%)	33 (-11%)	0 (-22%)	-1.08 (-1.72)	1.63 (-1.55)	2.52 (-1.94)	0.51 (+0.17)

Для прогноза приземной температуры получены следующие результаты в экспериментальных схемах:

- уменьшилось количество случаев с ошибкой более 2°C;
- для рабочих схем наблюдается занижение температуры примерно на 3°C (средняя ошибка);
- для экспериментальных схем занижение снизилось более чем в 2 раза;
- среднеквадратическая ошибка прогноза температуры уменьшилась примерно на 2°C;

- коэффициент корреляции прогнозных и фактических значений превысил 0.5.

Рисунок 4 - Сравнительная оценка качества прогноза: осадки, март 2022 г., заблаговременность 36 часов

Показатель	WRF_3	WRF_15	WRF_EXP_15	WRF_EXP_3	WRF_GEO	WRF_OPER
Шаг	3 км	15 км	15 км	3 км	3 км	3 км
РС, %	72	67	71 (+4%)	74 (+2%)	72	73 (+1%)
FAR, %	82	84	81 (-3%)	78 (-4%)	80 (-2%)	79 (-3%)
НК	0.49	0.46	0.52 (+0.6)	0.58 (+0.9)	0.55 (+0.6)	0.58 (+0.9)

Для прогноза осадков получены следующие результаты в экспериментальных схемах:

- доля правильных прогнозов (РС) увеличилась на 1-4 процентных пункта.
- коэффициент ложных тревог (FAR) уменьшился на 2-4 процентных пункта.
- критерий Пирси-Обухова (НК) увеличился, что означает увеличение способности прогноза к выявлению различий между случаями с осадками и без осадков (значение 0.6 – 0.7 означает высокую успешность альтернативного прогноза).

Рисунок 5 - Сравнительная оценка качества прогноза: приземное давление, январь-март 2022 г., заблаговременность 24 часа

Модель	Шаг	Средняя вероятность ошибок, %			Средняя ошибка	Ср. абс. ошибка	Ср. кв. ошибка	Коэф. корр.
		0-1.5 гПа	1.5-3 гПа	>3 гПа				
WRF_3	3 км	56	38	5	0.43	1.43	1.79	0.89
WRF_15	15 км	45	50	5	0.4	1.6	2.08	0.86
WRF_EXP_15	15 км	70 (+25%)	26 (-24%)	4 (-1%)	-0.59 (-0.99)	1.15 (-0.45)	1.66 (-0.42)	0.94 (+0.08)
WRF_EXP_3	3 км	74 (+18%)	22 (-16%)	4 (-1%)	-0.63 (-1.06)	1.12 (-0.31)	1.64 (-0.15)	0.94 (+0.05)
WRF_GEO	3 км	100 (+44%)	0 (-38%)	0 (-5%)	0.25 (-0.18)	0.65 (-0.78)	0.99 (-0.80)	0.94 (+0.05)
WRF_OPER	3 км	100 (+44%)	0 (-38%)	0 (-5%)	0.23 (-0.2)	0.65 (-0.78)	0.99 (-0.80)	0.93 (+0.04)

Для прогноза приземного давления получены следующие результаты в экспериментальных схемах:

- количество случаев с ошибкой 1.5-3 гПа уменьшилось на 16-38 процентных пунктов;
- среднеквадратическая ошибка уменьшилась на 0.8 гПа;

- коэффициент корреляции между прогнозным и фактическим давлением превысил 93%;

- другие статистические характеристики изменились незначительно.

Одновременно со статистической оценкой результатов была определена оправдываемость прогнозов по ТКП по областям Республики Беларусь и с заблаговременностью от 12 до 36 часов. Результаты за тот же период января 2022 года по оправдываемости температуры и осадков приведены в последующих таблицах.

Желтым цветом выделена оправдываемость рабочих схем. В зеленой зоне представлены значения оправдываемости по экспериментальным схемам, в которых значение оправдываемости выросло по сравнению с рабочими схемами.

Рисунок 6 - Оправдываемость температуры по Беларуси по ТКП, 23-31 янв. 2022

Область	+12						+24						+36					
	WRF 3	WRF 15	EXP 15	EXP 3	GEO	OPER	WRF 3	WRF 15	EXP 15	EXP 3	GEO	OPER	WRF 3	WRF 15	EXP 15	EXP 3	GEO	OPER
БРЕСТСКАЯ	96	95	99	99	100	100	74	76	97	93	96	97	89	90	97	99	99	99
ВИТЕБСКАЯ	83	83	92	95	97	96	53	59	84	84	77	83	82	81	91	92	93	94
ГОМЕЛЬСКАЯ	75	73	99	99	99	98	51	51	92	91	81	87	75	80	93	94	99	99
ГРОДНЕНСКАЯ	99	98	99	99	100	100	81	76	92	90	94	89	94	90	97	99	100	100
МИНСКАЯ	87	85	97	100	100	100	60	68	94	94	87	94	85	80	92	95	96	94
БРЕСТСКАЯ	64	60	84	86	95	83	41	50	68	67	64	67	72	73	84	83	93	85
Среднее	84	82	95	96	99	96	60	63	88	87	83	86	83	82	92	94	97	95

Рисунок 7 - Оправдываемость осадков по Беларуси по ТКП, 23-31 янв. 2022

Область	+12						+24						+36					
	WRF 3	WRF 15	EXP 15	EXP 3	GEO	OPER	WRF 3	WRF 15	EXP 15	EXP 3	GEO	OPER	WRF 3	WRF 15	EXP 15	EXP 3	GEO	OPER
БРЕСТСКАЯ	92	92	98	98	79	79	97	100	100	100	79	79	96	92	94	97	77	77
ВИТЕБСКАЯ	81	84	98	98	98	100	86	88	96	92	100	100	90	90	82	95	98	98
ГОМЕЛЬСКАЯ	95	93	96	98	97	96	97	92	100	99	100	100	89	83	89	97	94	91
ГРОДНЕНСКАЯ	96	98	100	98	100	100	94	91	97	97	99	99	88	82	93	96	94	94
МИНСКАЯ	92	89	100	100	99	97	91	98	99	98	98	100	98	92	92	98	97	97
БРЕСТСКАЯ	97	91	100	100	99	99	94	96	98	99	100	100	97	92	92	97	97	97
Среднее	92	91	99	99	95	95	93	94	98	98	96	96	93	89	90	97	93	92

Как видно из приведенных таблиц, оправдываемость прогнозов выросла как по температуре, так и по осадкам.

Менее впечатляющий результат получен в одном из летних периодов. В августе 2022 года значения оправдываемости по рабочим схемам (выделены желтым) находятся на достаточно высоком уровне и повышения оправдываемости по температуре не произошло. Однако для осадков оправдываемость прогнозов всё-таки выросла. В большей степени это касается технологических схем, вычисляющих прогноз с шагом 3 км.

**Рисунок 8 - Оправдываемость температуры по областям по ТКП,
01-31 августа 2022**

Область	+12						+24						+36					
	WRF 3	WRF 15	EXP 15	EXP 3	GEO	OPER	WRF 3	WRF 15	EXP 15	EXP 3	GEO	OPER	WRF 3	WRF 15	EXP 15	EXP 3	GEO	OPER
БРЕСТСКАЯ	97	97	96	97	93	96	91	93	95	92	89	90	93	89	86	86	92	93
ВИТЕБСКАЯ	100	100	100	100	100	100	93	93	90	92	89	92	99	98	98	98	99	99
ГОМЕЛЬСКАЯ	92	92	90	91	87	89	96	93	94	95	92	92	82	80	76	76	81	80
ГРОДНЕНСКАЯ	98	98	98	98	96	97	96	93	90	96	90	94	98	97	97	97	96	97
МИНСКАЯ	98	98	98	96	94	94	93	93	92	94	88	88	99	97	97	97	94	93
БРЕСТСКАЯ	97	97	97	97	95	97	96	96	97	96	91	94	92	91	91	88	96	95
Среднее	97	97	97	97	94	96	94	94	93	94	90	92	94	92	92	90	93	93

**Рисунок 9 - Оправдываемость осадков по областям по ТКП, 01-31
августа 2022**

Область	+12						+24						+36					
	WRF 3	WRF 15	EXP 15	EXP 3	GEO	OPER	WRF 3	WRF 15	EXP 15	EXP 3	GEO	OPER	WRF 3	WRF 15	EXP 15	EXP 3	GEO	OPER
БРЕСТСКАЯ	90	86	87	91	90	89	94	94	90	96	94	94	93	83	83	91	86	87
ВИТЕБСКАЯ	94	90	90	93	98	92	95	93	94	94	96	95	92	90	84	91	91	92
ГОМЕЛЬСКАЯ	91	87	86	92	95	94	88	85	83	91	96	94	89	82	79	88	95	91
ГРОДНЕНСКАЯ	89	85	87	89	91	90	97	95	95	95	96	97	91	91	88	89	86	88
МИНСКАЯ	91	84	85	91	91	93	95	95	94	95	98	97	92	88	85	90	94	95
БРЕСТСКАЯ	94	86	86	96	96	94	95	94	94	94	97	96	89	84	82	88	93	93
Среднее	92	86	87	92	94	92	94	93	92	94	96	96	91	86	84	90	91	91

В целом результаты проведенной работы являются весьма обнадеживающими. Наблюдается повышение качества численных прогнозов по экспериментам, особенно для холодного периода года. Среднеквадратическая ошибка прогноза приземной температуры воздуха уменьшилась в среднем на 1.2°C в зимний период и для ночных сроков. Для тех же условий оправдываемость прогноза по ТКП в экспериментах увеличилась на 10%. Доля правильных прогнозов по осадкам в экспериментах увеличилась на 4%. Для температуры на уровнях 850, 700, 500 гПа достигнуто незначительное уменьшение ошибки прогноза, по сравнению с приземной температурой. Исследуемые технологические схемы на основе модели WRF внедрены в Белгидромете в опытную эксплуатацию.

На этом работа не прекращена. Следующий этап научно-исследовательских работ по повышению точности прогнозов, проводимых Белгидрометом совместно с Институтом природопользования НАН Беларуси – это ассимиляция данных температурно-ветровых профилемеров в мезомасштабную модель WRF-ARW.

Подводя итог, стоит отметить, что результаты работ по совершенствованию качества прогнозов погоды и развитию прогностических технологий зависит от людей и их стремления к результату, в связи с чем крайне важно привлекать в эту область специалистов, в том числе молодых,

имеющих соответствующее образование и проявляющих интерес к данной теме.