

**Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды  
(РОСГИДРОМЕТ)**

**Федеральное государственное бюджетное учреждение  
“ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ”**

## **ИНФОРМАЦИОННЫЙ СБОРНИК**

**№ 51**

**Результаты испытания новых и усовершенствованных  
технологий, моделей и методов гидрометеорологических  
прогнозов**

Под редакцией  
канд. геогр. наук А.А. Алексеевой

## УДК 551.5

Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов / под редакцией канд. геогр. наук А.А. Алексеевой. – 2024. – **Информационный сборник № 51.** – 128 с.

Изложены основы и результаты испытания научных разработок, решениями Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета рекомендованных к внедрению в оперативную практику. В первой статье представлены основы технологии среднесрочного прогноза на основе модели ПЛАВ10 с горизонтальным разрешением около 10 км и результаты оперативных испытаний. Во второй статье рассматриваются основы и результаты оперативных испытаний технологии детализированных по времени ансамблевых долгосрочных прогнозов с еженедельной дискретностью выпуска на основе модели ПЛАВ072L96. Следующие две статьи посвящены сезонному метеорологическому прогнозу и сверхдолгосрочному прогнозированию состояния климатической системы на основе климатической модели ИВМ РАН INM-CM5. В статьях по агрометеорологии излагаются результаты производственных испытаний метода долгосрочного прогноза урожайности и валового сбора ярового ячменя по федеральным округам и России в целом, технологии оценки условий вегетации и прогноза урожайности гречихи по субъектам Российской Федерации, а также прогноза урожайности картофеля по Иркутской области. Статьи по гидрологии освещают основы и результаты испытания методик краткосрочного и среднесрочного прогноза расходов и уровней воды на реках бассейнов Тобола и Дона. В двух статьях морской тематики излагаются результаты испытания систем (технологических линий) прогноза волнения в бухте Нагаева Охотского моря с заблаговременностью до 5 суток и волнения в прибрежных районах Восточной Арктики.

Для научных работников в области синоптической метеорологии, гидродинамических, агрометеорологических, морских гидрологических и гелиогеофизических прогнозов и специалистов службы прогноза погоды, аспирантов и студентов.

**ISBN 978-5-9908623-7-1**

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ  
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ СОСТАВЛЕНИЯ  
ОЦЕНКИ УСЛОВИЙ ВЕГЕТАЦИИ И ПРОГНОЗА УРОЖАЙНОСТИ  
ГРЕЧИХИ ПО СУБЪЕКТАМ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
В ГИДРОМЕТЦЕНТРЕ РОССИИ**

<sup>1</sup>*Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной  
метеорологии, г. Обнинск;*

<sup>2</sup>*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, г. Москва*

**Автоматизированная технология составления оценки условий  
вегетации и прогноза урожайности сельскохозяйственных культур**

58

В системе оперативного агрометеорологического обеспечения сельского хозяйства особая роль отводится агрометеорологическим прогнозам урожайности зерновых культур. Согласно Плану выпуска основных агрометеорологических прогнозов и докладов Росгидромета, прогноз средней урожайности и валового сбора зерна гречихи составляется по субъектам Российской Федерации в ФГБУ «Гидрометцентр России» 21 июня и уточняется 21 июля. По данным Росстата в Российской Федерации посевные площади под гречихой в среднем за пятилетний период 2018–2022 гг. составили 964,74 тыс. га, в том числе в Алтайском крае – 532,0 тыс. га, Башкортостане – 68,3 тыс. га, Оренбургской области – 37,2 тыс. га, Орловской области – 57,4 тыс. га. Валовые сборы гречихи заметно колеблются по годам в зависимости от урожайности, связанной с погодными условиями.

В ФГБУ «ВНИИСХМ» в 2017–2019 гг. на основе динамической модели формирования продукционного процесса сельскохозяйственных культур разработана динамическая модель и динамико-статистический метод прогноза урожайности гречихи, созданы методики для прогнозирования урожайности гречихи в субъектах РФ.

Данная работа является продолжением работ по разработке динамико-статистических методов прогнозов урожайности основных сельскохозяйственных культур (озимой и яровой пшеницы, озимой ржи, ярового ячменя, кукурузы на зерно, зерновых и зернобобовых

культур в целом, картофеля) для использования в оперативных подразделениях Росгидромета при составлении прогнозов урожайности и валового сбора сельскохозяйственных культур [5, 9–11, 13].

Временные ряды урожайности гречихи рассматриваются как сумма двух слагаемых – детерминированной составляющей, зависящей от культуры земледелия в конкретных почвенно-климатических условиях, и случайных отклонений от нее, обусловленных колебаниями погоды конкретных лет. Прогнозируемая урожайность рассчитывается с учетом обеих составляющих временного ряда: тренда – путем экстраполяции по методу гармонических весов и отклонений от тренда – с помощью метода оценки агрометеорологических условий формирования урожая. В основу моделирования продукционного процесса положено описание «поведения» ряда наблюдаемых физиологических процессов (фотосинтеза, дыхания, роста и распределения ассимилятов), т. е. «создается» некоторый реальный аналог жизни растений.

Числовые параметры, входящие константами в формулы, биометрические параметры, являющиеся характеристиками, присущими определенной сельскохозяйственной культуре, для гречихи установлены экспериментальным путем: динамика удельной поверхностной плотности листьев и стеблей, соотношение отдельных органов растений, сухой биомассы и площадь поверхности отдельных органов «среднего» растения гречихи на дату всходов. Данные получены в мелкоделяночных опытах, проводившихся ранее на агрометеорологической базе им. В.В. Синельникова в Калужской области [8].

Функциональные параметры (суммы эффективных температур воздуха), характеризующие влияние изменения возраста органов растения на интенсивность фотосинтеза, роста, дыхания, устанавливаются для территории каждого субъекта на основании данных об агроклиматических условиях произрастания сельскохозяйственных культур.

Начало периода расчета по модели определяется самой ранней средней многолетней датой всходов гречихи, а окончание – средней датой созревания на территории области. Суммы эффективных температур, устанавливающие точки перегиба, максимума и минимума в функциональных зависимостях, вычисляются в зависимости от средних многолетних дат наступления основных фаз развития гречихи (появление соцветий, цветение, созревание) на территории субъекта.

В используемой модели установлены функциональные зависимости параметров модели от текущих погодных условий, определяемых следующими оперативными декадными данными – значениями температуры воздуха и сумм осадков. Функция воздействия

температуры воздуха на фотосинтез представлена температурной кривой, а функция воздействия влажности почвы на фотосинтез заменена на функцию влияния осадков.

В основу количественной оценки агрометеорологических условий вегетации сельскохозяйственных культур положено отношение биомассы репродуктивного органа, рассчитанной по модели с использованием информации, характеризующей условия оцениваемого периода, к биомассе репродуктивного органа, рассчитанной по модели по средним многолетним данным. Численное значение оценки (С) позволяет количественно характеризовать условия формирования урожая. Если численное значение оценки близко к 100 %, то агрометеорологические условия оцениваемого периода близки к средним многолетним. Значение «С» больше 100 % означает, что условия оцениваемого периода более благоприятны для формирования урожая по сравнению со средними многолетними значениями. Худшие условия формирования урожая по сравнению со среднемноголетними условиями характеризуются значением оценки меньше 100 % (рис. 1).

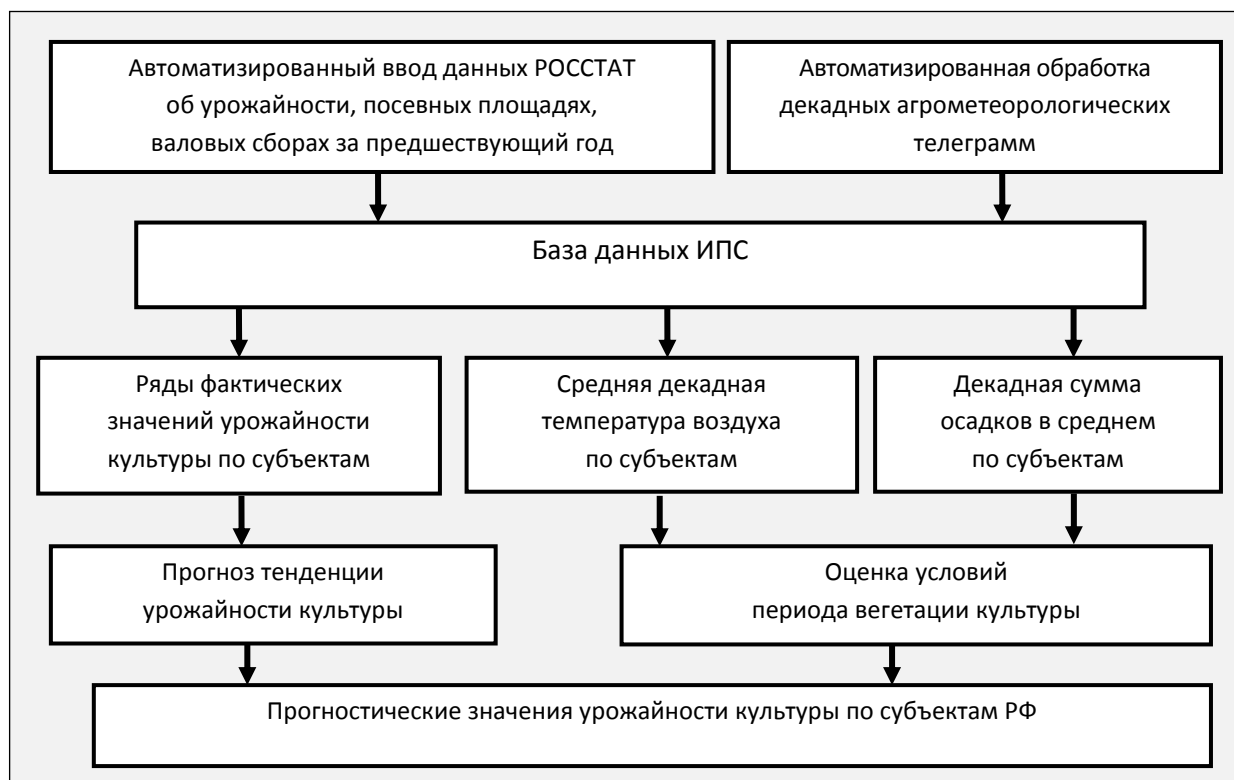


**Рис. 1.** Блок-схема динамической модели продукционного процесса продуктивности сельскохозяйственных растений.

Создание динамической модели продукционного процесса и динамико-статистического метода прогноза урожайности гречихи позволили разработать методики прогноза урожайности указанной культуры для 20 субъектов РФ (субъекты, в которых валовой сбор гречихи составляет более 5 тыс. т).

После проведения авторских испытаний разработанного метода прогноза урожайности гречихи по субъектам РФ, в существующей информационно-прогностической системе (ИПС) создана новая подсистема оценки условий вегетации и прогноза урожайности гречихи по 20 субъектам РФ.

Блок-схема автоматизированной технологии составления оценки условий вегетации и прогноза урожайности сельскохозяйственных культур в ИПС представлена на рис. 2.



**Рис. 2.** Блок-схема автоматизированной технологии составления оценок условий вегетации и прогноза урожайности сельскохозяйственных культур.

База данных ИПС содержит оперативные агрометеорологические данные, полученные в результате обработки декадных телеграмм, а также данные Росстата об урожайности, валовом сборе и посевных площадях сельскохозяйственных культур.

ИПС позволяет на базе одного ПК осуществлять обработку декадных телеграмм, ежедекадно получать оценку условий вегетационного периода и проводить расчеты ожидаемой урожайности сельскохозяйственных культур по единой методике одновременно по всем субъектам РФ, установленные Планом выпуска основных агрометеорологических прогнозов и докладов [1, 2, 4, 6, 7, 14].

В существующей информационно-прогностической системе (ИПС) создана новая подсистема оценки условий вегетации и прогноза урожайности гречихи по 20 субъектам РФ.

В программах, реализующих расчет агрометеорологических оценок и прогнозов, используются данные, хранящиеся в двух источниках:

- непосредственно в самих программах;
- в базе оперативных данных.

В программу расчета включены средние многолетние данные вегетационного периода по субъекту РФ: средняя декадная температура воздуха, сумма осадков за декады, густота стояния растений на первое определение, даты фаз развития культуры и т. д. (т. е. все то, что необходимо для настройки и работы модели гречихи в определенных почвенно-климатических условиях конкретного субъекта).

Из базы оперативных данных в расчетах используются оперативные данные о средних декадных значениях температуры воздуха и декадных суммах осадков по станциям, ряды урожайности гречихи с уборочной площади 1971 года по год прогноза, а также оперативные статистические данные по субъектам РФ о размерах посевных площадей, занятых сельскохозяйственными культурами в текущем сельскохозяйственном году. Данные о посевных площадях необходимы для расчета ожидаемого валового сбора в прогнозируемом году по территории конкретного субъекта РФ и расчета прогноза урожайности по федеральным округам и России в целом. После получения фактических данных об урожайности культуры за прогнозируемый год и внесения их в базу данных, предусмотрена оценка оправдываемости составленных прогнозов в соответствии с действующей Инструкцией по оценке оправдываемости оперативных агрометеорологических прогнозов [3]. Критерием оценки оправдываемости оперативных прогнозов урожайности является относительная ошибка ( $P$ , %) – частное от деления абсолютной разности между фактической и прогнозируемой урожайностью на фактическую урожайность, выраженное в процентах. Оправдываемость прогнозов (%) рассчитывается по формуле:  $100 \% - P$ .

Разработанная в ФГБУ «ВНИИСХМ» информационная подсистема оценки условий вегетации и прогноза гречихи по субъектам РФ с включенной в нее схемой расчета прогноза урожайности гречихи по территории федеральных округов и России в целом на основе прогноза урожайности по субъектам была установлена в ИПС ФГБУ «Гидрометцентр России» для производственных испытаний.

На рис. 3 показаны основные меню ИПС, с помощью которых осуществляется расчет прогнозируемой урожайности гречихи.

Примеры выходных файлов подсистемы прогноза урожайности гречихи по субъектам РФ и с расчетом оправдываемости составленных оперативных прогнозов приведены на рис. 4 и 5.

В период вегетации гречихи в ИПС ежедекадно можно получать оценку условий вегетации гречихи по сравнению со средними многолетними условиями, приравненными

к 100 %. На рис. 6 показан пример оценки условий вегетации гречихи, сложившихся на конец третьей декады июня в 2022 году.

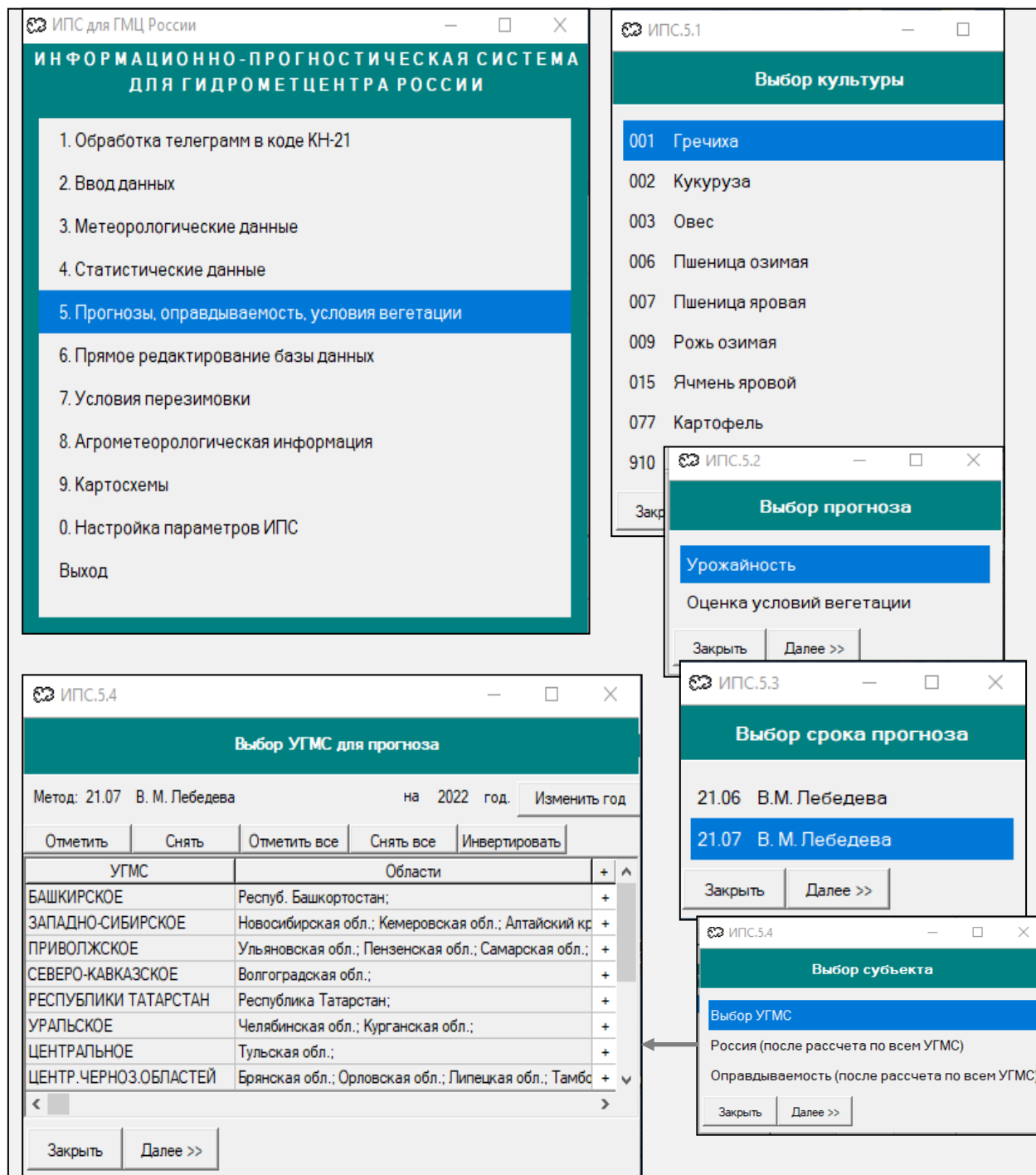


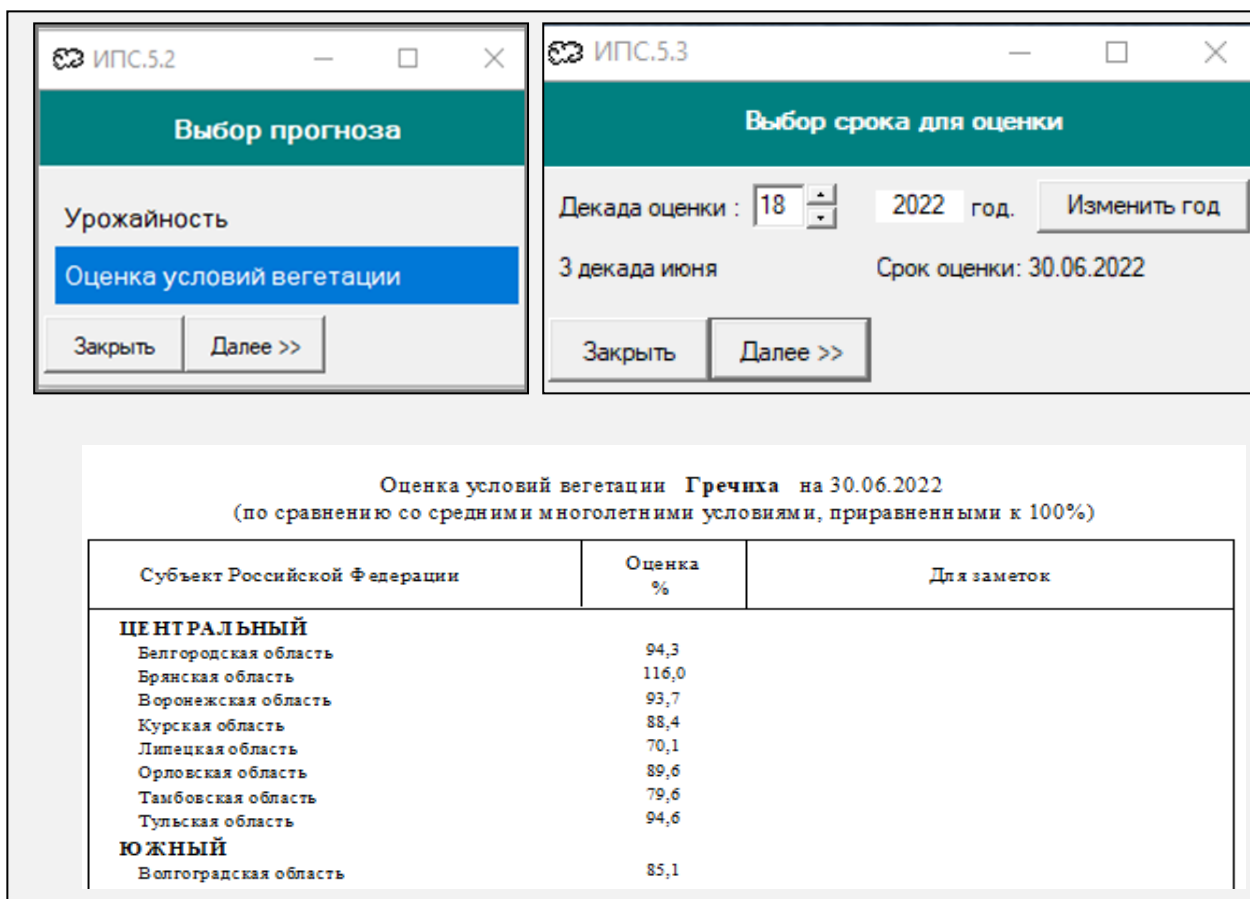
Рис. 3. Меню ИПС, используемые для расчета прогнозируемой урожайности гречихи.

Прогноз урожайности в расчете с уборочной площади на 21.07.2022					
Культура - Гречиха					
Автор(ы) метода: В. М. Лебедева					
Федеральный округ, субъект Российской Федерации	Тенденция урожайности, ц/га	Оценка условий вегетации, %	Прогноз урожайности ц/га	Уборочная площадь, тыс. га	Валовой сбор, тыс. тонн
<b>ЦЕНТРАЛЬНЫЙ</b>					
Белгородская область	13,2	95,2	12,60	2,00	2.52
Брянская область	10,3	110,7	11,40	5,70	6.49
Воронежская область	11,0	98,4	10,90	7,20	7.82
Курская область	12,9	91,4	11,80	10,00	11.77
Липецкая область	11,7	76,4	8,90	6,50	5.81
Орловская область	11,9	87,7	10,40	46,90	48.80
Тамбовская область	12,0	95,6	11,50	7,70	8.85
Тульская область	11,9	109,4	13,10	11,20	14.64
			<b>11.0</b>	<b>97,20</b>	<b>106.75</b>
<b>ЮЖНЫЙ</b>					
Волгоградская область	8,0	105,8	8,50	2,00	1.70
			<b>8.5</b>	<b>2,00</b>	<b>1.70</b>
<b>ПРИВОЛЖСКИЙ</b>					
Пензенская область	9,5	100,9	9,60	5,20	4.98
Республика Башкортостан	9,6	107,9	10,30	72,90	75.38
Республика Татарстан	11,0	88,3	9,70	15,20	14.77
Самарская область	9,0	108,0	9,70	8,70	8.46
Саратовская область	8,1	88,1	7,10	9,90	7.02
Ульяновская область	8,5	103,2	8,80	5,30	4.65
			<b>9.8</b>	<b>117,20</b>	<b>114.96</b>
<b>УРАЛЬСКИЙ</b>					
Курганская область	10,0	124,1	12,40	21,50	26.65
Челябинская область	7,1	133,8	9,60	29,30	27.99
			<b>10.8</b>	<b>50,80</b>	<b>54.79</b>
<b>СИБИРСКИЙ</b>					
Алтайский край	9,6	106,2	10,10	655,30	664.36
Кемеровская область	10,3	97,6	10,10	0,00	0.00
Новосибирская область	10,0	99,5	10,00	55,10	55.03
			<b>10.1</b>	<b>710,40</b>	<b>716.95</b>
<b>РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ</b>			<b>10,2</b>	<b>977.60</b>	<b>995.15</b>

Рис. 4. Пример файла с результатами расчета ожидаемой урожайности гречихи по субъектам РФ и федеральным округам.

Оправдываемость метода прогноза урожайности на 21.07.2022				
Культура - Гречиха				
Автор(ы) метода: В. М. Лебедева				
Субъект Российской Федерации	Прогноз урожайности, ц/га	Фактическая урожайность, ц/га	Относительная ошибка, %	Оправдываемость прогноза, %
Брянская обл.	11.4	9.7	17,2	82,8
Орловская обл.	10.4	13.0	20,3	79,7
Липецкая обл.	8.9	15.6	42,8	57,2
Тамбовская обл.	11.5	11.9	3,7	96,3
Курская обл.	11.8	17.9	34,0	66,0
Белгородская обл.	12.6	16.1	21,7	78,3
Воронежская обл.	10.9	13.3	18,3	81,7
Тульская обл.	13.1	14.5	9,5	90,5
Республика Татарстан	9.7	11.8	18,1	81,9
Ульяновская обл.	8.8	12.7	30,5	69,5
Пензенская обл.	9.6	10.6	9,1	90,9
Самарская обл.	9.7	10.9	10,9	89,1
Саратовская обл.	7.1	10.0	28,8	71,2
Оренбургская обл.				
Волгоградская обл.	8.5	7.8	9,1	90,9
Челябинская обл.	9.6	7.9	21,7	78,3
Курганская обл.	12.4	12.3	0,5	99,5
Респуб. Башкортостан	10.3	11.1	6,9	93,1
Новосибирская обл.	10.0	10.0	0,3	99,7
Кемеровская обл.	10.1			
Алтайский кр.	10.1	11.3	10,8	89,2

Рис. 5. Пример файла с результатами расчета оправдываемости прогнозов урожайности гречихи.



**Рис. 6.** Меню ИПС и пример файла с оценкой условий вегетации гречихи, сложившихся на конец третьей декады июня в 2022 г.

**Испытания автоматизированной технологии  
составления оценки условий вегетации и прогноза урожайности гречихи  
в ФГБУ «Гидрометцентр России»**

Производственные испытания метода проводились в ФГБУ «Гидрометцентр России» в рамках ИПС в течение трех лет: в 2017–2019 гг. были проведены испытания метода прогноза гречихи по 20 субъектам РФ. Прогнозы урожайности гречихи составляются в вегетационный период с различной заблаговременностью до созревания: за два месяца – 21 июня, за один месяц – 21 июля.

Согласно Методическим указаниям [12] оценка успешности агрометеорологических прогнозов проводилась на материалах независимой выборки с помощью двух критериев: оправдываемости метода и ошибки оправдавшихся прогнозов.

Оправдываемость метода – отношение числа оправдавшихся прогнозов к общему числу составленных прогнозов по методу, выраженное в процентах. Критерий оправдываемости прогноза – абсолютная ошибка прогноза, не превышающая  $0,8 \sigma$  (для

первого срока прогноза) и  $0,67 \sigma$  (для второго срока прогноза) ряда урожайности за последние 15 лет, включая год прогноза. Ошибка метода – среднее арифметическое значение относительных ошибок (%) оправдавшихся прогнозов. Относительная ошибка оправдавшихся прогнозов рассчитывается как частное от деления абсолютной разности фактического урожая и прогнозируемого на среднее арифметическое значение фактического урожая за последние пять лет, выраженное в процентах. Испытываемый метод рекомендуется к внедрению в оперативную работу, если не менее 70 % пунктов исследуемой территории имеют показатели «оправдываемость» и «ошибка» метода выше аналогичных показателей инерционного и климатологического прогнозов. Выводы о приемлемости метода для оперативной работы делаются на основании испытаний в течение 5–8 лет, из них авторские испытания в течение 3–5 лет и производственные испытания в течение 2–3 лет.

В табл. 1 и 2 показаны результаты авторских и производственных испытаний динамико-статистического метода прогноза урожайности гречихи для двух сроков прогноза. Для сравнения в таблицах приведены прогностические значения урожайности гречихи, рассчитанные с помощью инерционного и климатологического методов прогнозов [9].

В первый срок прогноза по РД 52.27.284–91 оправдываемость испытываемого метода для 15 субъектов Европейской территории России составила 87 %. При этом в Брянской и Самарской областях оправдываемость испытываемого метода оказалась несколько ниже, чем в инерционном и (или) климатологическом методе. Во второй срок прогноза оправдываемость метода по территории ЕТР составила 93 %, так как в Брянской области оправдываемость испытываемого метода составила 87 %, а инерционного – 100 % (табл. 1, 2).

По пяти субъектам Азиатской территории России в первый срок прогноза оправдываемость испытываемого метода составила 90 %; поскольку в Кемеровской области при оправдываемости прогнозов, равной 75 %, ошибка оправдавшихся прогнозов по инерционному методу оказалась ниже, чем по испытываемому, соответственно, 8,1% и 9,1 %. Во второй срок прогноза оправдываемость испытываемого метода составила 100 % (табл. 1, 2).

В табл. 3 приведены результаты оценки прогнозов по относительной ошибке за три года производственных испытаний в ФГБУ «Гидрометцентр России» в соответствии с Инструкцией по оценке оправдываемости агрометеорологических прогнозов [3].

Результаты производственных испытаний по субъектам Европейской территории России (15 субъектов) в 2020 и 2022 гг. показали хорошую оправдываемость испытываемого метода прогноза в оба срока его составления, средняя относительная ошибка прогнозов составила 81–82 %, а оправдываемость метода по территории составляет 79–86 %.

Результаты авторских и производственных испытаний  
динамико-статистического метода прогноза урожайности гречихи  
с заблаговременностью два месяца (первый срок прогноза)

Субъект Российской Федерации	Метод прогноза					
	испытываемый		инерционный		климатологический	
	Оправды- ваемость, %	Ошибка, %	Оправды- ваемость, %	Ошибка %	Оправды- ваемость, %	Ошибка, %
<b>Европейская территория России</b>						
1. Брянская обл.	87,5	8,8	100	9,4	87,5	8,1
2. Орловская обл.	62,5	8,4	62,5	15,1	62,5	15,3
3. Липецкая обл.	50,0	5,8	37,5	15,2	50,0	16,0
4. Тамбовская обл.	87,5	11,1	62,5	14,8	62,5	24,5
5. Курская обл.	62,5	6,6	62,5	8,1	62,5	10,5
6. Белгородская обл.	75,0	8,4	25,0	5,5	62,5	12,7
7. Воронежская обл.	87,5	10,4	62,5	11,1	50,0	11,8
8. Тульская обл.	75,0	9,1	25,0	14,6	50,0	19,6
9. Респ. Татарстан	87,5	13,2	37,5	15,3	87,5	18,2
10. Пензенская обл.	87,5	16,8	62,5	12,7	75,0	15,3
11. Самарская обл.	75,0	9,7	62,5	12,1	87,5	17,5
12. Саратовская обл.	75,0	8,8	50,0	16,5	75,0	20,4
13. Оренбургская обл.	62,5	15,0	25,0	4,8	62,5	22,5
14. Волгоградская о.	75,0	5,2	75,0	18,2	75,0	14,0
15. Респ. Башкортостан	100	8,4	62,5	9,7	75	10,1
<b>Среднее</b>	<b>76,7</b>	<b>9,7</b>	<b>54,2</b>	<b>12,2</b>	<b>68,3</b>	<b>15,8</b>
<b>Оправдываемость по территории</b>	<b>87</b>					
<b>Азиатская территория России</b>						
16. Челябинская обл.	100	11,2	100	16,0	87,5	10,7
17. Курганская обл.	100	10,9	87,5	10,5	100	12,9
18. Новосибирская обл.	87,5	10,2	75,0	11,5	62,5	9,7
19. Кемеровская обл.	75,0	9,1	62,5	13,2	75,0	8,1
20. Алтайский край	87,5	9,9	62,5	7,1	75,0	8,3
<b>Среднее</b>	<b>90</b>	<b>10,3</b>	<b>77,5</b>	<b>11,7</b>	<b>80</b>	<b>9,9</b>
<b>Оправдываемость по территории</b>	<b>80</b>					

Результаты авторских и производственных испытаний  
динамико-статистического метода прогноза урожайности гречихи  
с заблаговременностью два месяца (второй срок прогноза)

Субъект Российской Федерации	Метод прогноза					
	испытываемый		инерционный		климатологический	
	Оправды- ваемость, %	Ошибка, %	Оправды- ваемость %	Ошибка %	Оправды- ваемость %	Ошибка, %
<b>Европейская территория России</b>						
1. Брянская обл.	87,5	8,4	100	9,6	87,5	7,8
2. Орловская обл.	62,5	12,4	50,0	13,0	37,5	10,0
3. Липецкая обл.	62,5	10,1	25,0	9,2	37,5	13,6
4. Тамбовская обл.	87,5	10,7	37,5	11,3	50,0	18,3
5. Курская обл.	62,5	7,9	62,5	8,1	62,5	10,5
6. Белгородская обл.	62,5	8,2	25,0	5,5	50,0	10,1
7. Воронежская обл.	87,5	10,3	62,5	11,1	50,0	11,8
8. Тульская обл.	87,5	7,3	12,5	3,9	25,0	10,6
9. Респ. Татарстан	100,0	12,1	25,0	7,7	75,0	17,1
10. Пензенская обл.	87,5	11,0	62,5	12,3	75,0	15,2
11. Самарская обл.	87,5	6,3	62,5	12,1	75,0	15,1
12. Саратовская обл.	75,0	13,1	50,0	16,5	50,0	14,5
13. Оренбургская обл.	62,5	9,3	25,0	9,3	37,5	18,9
14. Волгоградская о.	87,5	9,3	62,5	15,1	50,0	7,8
15. Респ. Башкортостан	87,5	4,9	62,5	9,7	75,0	10,1
<b>Среднее</b>	<b>79,2</b>	<b>9,4</b>	<b>48,3</b>	<b>10,3</b>	<b>55,8</b>	<b>12,8</b>
<b>Оправдываемость по территории</b>	<b>93</b>					
<b>Азиатская территория России</b>						
16. Челябинская обл.	87,5	9,1	87,5	13,9	87,5	10,7
17. Курганская обл.	87,5	4,8	87,5	10,5	100	12,9
18. Новосибирская обл.	100,0	9,1	62,5	10,8	50,0	5,9
19. Кемеровская обл.	75,0	8,2	37,5	9,6	62,5	6,6
20. Алтайский край	87,5	9,4	62,5	7,1	62,5	5,5
<b>Среднее</b>	<b>87,5</b>	<b>8,1</b>	<b>67,5</b>	<b>10,4</b>	<b>72,5</b>	<b>8,3</b>
<b>Оправдываемость по территории</b>	<b>100</b>					

Оправдываемость прогнозов урожайности гречихи  
по субъектам РФ в период производственных испытаний  
в Гидрометцентре России в 2020–2022 гг.

Субъект Российской Федерации	Оправдываемость прогноза, %					
	2020 год		2021 год		2022 год	
	21.06	21.07	21.06	21.07	21.06	21.07
<b>Европейская территория России</b>						
1. Тульская обл.	98	93	46	92	94	90
2. Брянская обл.	100	91	51	46	81	82
3. Орловская обл.	61	63	56	54	83	80
4. Липецкая обл.	69	67	14	41	58	58
5. Тамбовская обл.	94	100	0	0	96	97
6. Курская обл.	72	73	63	18	68	66
7. Белгородская обл.	98	98	40	19	82	78
8. Воронежская обл.	74	73	19	52	81	82
9. Пензенская обл.	63	67	69	80	85	91
10. Самарская обл.	75	82	45	89	83	89
11. Саратовская обл.	95	76	29	9	69	71
12. Оренбургская обл.	82	96	–	–	–	–
13. Респ.. Башкортостан	78	76	92	90	88	93
14. Респ. Татарстан	83	81	0	83	80	82
15. Волгоградская обл.	77	82	37	73	100	91
<b>Среднее</b>	<b>81,3</b>	<b>81,2</b>	<b>40,1</b>	<b>53,3</b>	<b>82,0</b>	<b>82,1</b>
<b>Оправдываемость по территории</b>	<b>80,0</b>	<b>80,0</b>	<b>7,1</b>	<b>42,8</b>	<b>78,6</b>	<b>85,7</b>
<b>Азиатская территория России</b>						
16. Челябинская обл.	74	64	86	76	94	87
17. Курганская обл.	95	90	75	75	93	99
18. Новосибирская обл.	73	91	99	87	88	98
19. Кемеровская обл.	80	83	80	81	94	84
20. Алтайский край	86	90	92	91	91	89
<b>Среднее</b>	<b>81,6</b>	<b>83,6</b>	<b>86,4</b>	<b>82,0</b>	<b>92,0</b>	<b>91,4</b>
<b>Оправдываемость по территории</b>	<b>100</b>	<b>80</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

В 2021 году прогноз по Европейской территории России по большинству субъектов не оправдался, особенно по Тамбовской, Оренбургской областям и Республике Татарстан. В 2021 году в указанных субъектах в критически важный период формирования зерна гречихи (вторая

декада июня – вторая декада июля) наблюдалась жаркая, преимущественно сухая погода, во многих областях наблюдались низкие запасы продуктивной влаги и суховейные явления.

По пяти субъектам Азиатской территории России оправдываемость метода в период производственных испытаний дала хорошие результаты. Всего было составлено 30 прогнозов и только один из них был с оправдываемостью 64 % (Челябинская область, прогноз на 21 июля 2020 г.).

### **Рекомендации о внедрении**

Решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета от 25 декабря 2023 года автоматизированная технология составления оценок условий вегетации и прогнозов урожайности гречихи по 20 субъектам Российской Федерации рекомендована в качестве основного расчетного метода в ФГБУ «Гидрометцентр России». Методики прогноза урожайности гречихи по Тамбовской, Оренбургской областям и Республике Татарстан рекомендовано доработать в целях повышения оправдываемости прогноза.

В 2020–2021 гг. метод прогноза урожайности успешно прошел испытания в Центральном, Приволжском, Башкирском, Уральском УГМС и УГМС Республики Татарстан. Решениями Технических советов пяти УГМС метод был внедрен в оперативную практику в качестве основного метода для восьми субъектов и для одного субъекта – в качестве вспомогательного метода.

70

### **Список литературы**

1. Гончарова Т.А., Найдина Т.А., Лебедева В.М., Богомолова Н.А. Результаты авторских и производственных испытаний в ФГБУ «Гидрометцентр России» автоматизированной технологии составления оценки условий вегетации и прогноза урожайности яровой пшеницы и картофеля по субъектам Российской Федерации // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2014. – Информационный сборник № 41. – С. 111–126.

2. Гончарова Т.А., Найдина Т.А., Лебедева В.М., Береза О.В. Результаты испытания метода оценки условий вегетации и прогноза урожайности кукурузы с использованием спутниковой и наземной информации по субъектам Российской Федерации // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2018. – Информационный сборник № 45. – С. 127–136.

3. Инструкция по оценке оправдываемости агрометеорологических прогнозов. – М.: Гидрометеиздат, 1983. – 7 с.

4. *Клещенко А.Д., Лебедева В.М., Найдина Т.А., Гончарова Т.А., Шкляева Н.М.* Оперативное информационно-прогностическое обеспечение потребителей агрометеорологической продукции // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – 2015. – Вып. 179. – С. 33–43.

5. *Лебедева В.М., Страшная А.И.* Учебное пособие «Основы сельскохозяйственной метеорологии» Том II. «Методы расчетов и прогнозов в агрометеорологии». Книга 2. «Оперативное агрометеорологическое прогнозирование». – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. – 216 с.

6. *Лебедева В.М., Береза О.В.* Результаты испытания автоматизированной технологии составления оценок условий вегетации и прогноза урожайности озимой пшеницы по субъектам Российской Федерации // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2021. – Информационный сборник № 48. – С. 103–114.

7. *Лебедева В.М., Найдина Т.А., Береза О.В.* Результаты испытания автоматизированной технологии составления оценки условий вегетации и прогноза урожайности ярового ячменя по субъектам Российской Федерации в Гидрометцентре России // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2021. – Информационный сборник № 48. – С. 115–127.

8. *Коченова Р.П.* Об определении параметров динамической модели формирования урожая гречихи // Труды ВНИИСХМ. – 1986. – Вып.18. – С. 53–59.

9. *Полевой А.Н.* Прикладное моделирование и прогнозирование продуктивности посевов. – Л.: Гидрометеоиздат. 1988. – 320 с.

10. *Полевой А.Н., Русакова Т.И. и др.* Прикладная динамическая модель формирования урожая сельскохозяйственных культур // Сборник докладов: «Гидрометеорологическое обеспечение агропромышленного комплекса страны». – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – С. 15–31.

11. РД 52.33.810–2014. Порядок составления прогноза урожайности яровой пшеницы по субъектам Российской Федерации. – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2014. – 20 с.

12. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. – С. 98–107.

13. *Русакова Т.И.* О создании новой технологии оперативного агрометеорологического обеспечения агропромышленного комплекса России // Метеорология и гидрология. – 2004. – № 12. – С. 82–89.

14. *Русакова Т.И.* Автоматизированная система оценки агрометеорологических условий вегетации и прогноза урожайности озимой ржи и пшеницы по территории субъектов Российской Федерации // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2006. – Информационный сборник № 32. – С. 58–64.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА УРОЖАЙНОСТИ КАРТОФЕЛЯ ПО ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ**

<sup>1</sup> *Сибирский научно-исследовательский гидрометеорологический институт,  
г. Новосибирск;*

<sup>2</sup> *Новосибирский государственный аграрный университет, г. Новосибирск;*

<sup>3</sup> *Гидрометцентр ФГБУ «Иркутское УГМС», г. Новосибирск*

Методы прогноза урожайности картофеля на территории Иркутской области разработаны авторами статьи в рамках выполнения темы 1.2.4.2 Плана НИОКР Росгидромета на 2020–2024 гг. Рассматриваемые методы основаны на физико-статистических моделях, отражающих связи между урожайностью картофеля и основными метеорологическими и агрометеорологическими факторами.

Испытания методов проводились по территории Иркутской области, разработано по три модели для прогнозирования урожайности картофеля по сельскохозяйственным предприятиям и по всем категориям хозяйств, позволяющие прогнозировать урожайность картофеля на срок 1–3 августа. Агрометеорологические параметры выбирались из материалов наблюдений наземной сети гидрометеорологических станции Иркутской области. Выборка данных производилась из агрометеорологических ежегодников. Было выбрано 20 репрезентативно расположенных метеостанций наземной сети: Качуг, Киренск, Залари, Усть-Илимск, Новожилкино, Худоеланское, Железногорск, Тангуй, Тайшет, Тулун, Куйтун, Кутулик, Новонкутск, Бохан, Зима, Оса, Черемхово, Новочунка, Хомутово и Усть-Ордынский. Метеостанции в совокупности наиболее информативно отражают агрометеорологию Иркутской области.

Как известно у каждой сельскохозяйственной культуры свои требования к условиям среды, причем эти требования не остаются постоянными на протяжении всего вегетационного цикла, а меняются в зависимости от фаз развития растения. Для построения прогностических моделей использовались параметры, достаточно хорошо описывающие агрометеорологические условия периода вегетации: температура воздуха, осадки, дефицит

насыщения воздуха, а также комплексные показатели тепло- и влагообеспеченности за разные периоды [1–3].

Наиболее значимые показатели были включены в физико-статистические модели для расчета урожайности картофеля на территории Иркутской области. Разработка методов выполнялась с ориентацией на принятые в Росгидромете оперативные сроки составления прогноза урожайности картофеля (1–3 августа) и соответствующие критерии оправдываемости.

Для выполнения расчетов был разработан пакет программ для персонального компьютера и материалы информационного обеспечения: программа расчета прогноза урожайности картофеля по всем категориям хозяйств и сельскохозяйственным предприятиям Иркутской области и программа оценки прогнозов.

Авторские испытания методов прогноза урожайности проводились на независимом материале 2017–2019 годов. Производственные испытания методов осуществлялись в отделе агрометпрогнозов и агрометеорологии ФГБУ «Иркутское УГМС» в 2020–2022 годах.

Оценка успешности методов прогноза среднеобластной урожайности картофеля проводилась согласно Методическим указаниям [3]. Сравнительная оценка успешности испытываемых методов прогнозов осуществлялась в сравнении с инерционными и климатологическими прогнозами. С целью получения более достоверных выводов об испытываемых методах проанализирована оправдываемость прогнозов за период 2017–2022 гг., включая авторские и производственные испытания.

### **Результаты испытаний методов прогноза урожайности картофеля по Иркутской области**

По результатам авторской проверки (2017–2019 гг.) методические прогнозы урожайности картофеля по Иркутской области по всем моделям в течение трех лет обеспечили достаточно высокую оправдываемость. Средняя величина относительной ошибки методических прогнозов урожайности картофеля по всем категориям хозяйств на срок 1–3 августа составила 4,1 %, по сельскохозяйственным предприятиям – 8,5 %.

В годы производственных испытаний (2020–2022 гг.) методические прогнозы урожайности картофеля по всем категориям хозяйств оправдались лучше, чем по сельскохозяйственным предприятиям. Средняя величина относительной ошибки при производственных испытаниях методического прогноза урожайности картофеля по всем категориям хозяйств на срок 1–3 августа составила 4,8 %, по сельскохозяйственным предприятиям – 7 %. Оправдываемость прогноза урожайности картофеля по всем категориям хозяйств составила 93–97 %, по сельскохозяйственным предприятиям – 84–100 %. Метод

показал оправдываемость 84–86 % в 2022 г., когда был получен максимальный урожай (223 ц/га) за весь ряд урожайности с 1981 года.

В 2022 г. сложились благоприятные метеорологические условия для производства картофеля, на что отреагировали физико-статистические модели, входящие в технологию прогноза урожайности.

За 6 лет испытаний, включая годы авторской и оперативной проверки методов, по величине относительной ошибки оправдываемость прогнозов урожайности картофеля, составленных по новому методу, оказалась в пределах принятого порога успешности агрометеорологических прогнозов и составляла 92–97 % (таблица).

Таблица

Оправдываемость прогнозов урожайности картофеля по Иркутской области  
(по величине относительной ошибки)

№ модели	Методические прогнозы, оправдываемость, %			Инерционный прогноз	Климатологич. прогноз
	Авторские испытания (2017–2019)	Производ. испытания (2020–2022)	Средняя (2017–2022)	Средняя оправдываемость, %, (2017–2022)	
<b>По всем категориям хозяйств</b>					
1	97	97	97	98	98
2	97	95	96	98	98
3	95	93	94	98	98
<b>По сельскохозяйственным предприятиям</b>					
1	93	93	93	87	90
2	93	93	93	87	90
3	92	93	92	87	90

Оценка оправдываемости составленных прогнозов по новому методу за годы проверки (2017–2021 гг.) по величине допустимой погрешности ( $\Delta\sigma$ ), согласно РД 52.27.284–91 [4]? позволила выявить число оправдавшихся методических, инерционных и климатологических прогнозов, хорошо сработала модель 1 прогноза урожайности картофеля по всем категориям хозяйств, из методических прогнозов 4 прогноза из 5 оправдались, оправдываемость метода по модели 1 составила 80 %, что уступает в оправдываемости инерционному прогнозу и соответствует климатологическому. Оправдываемость по модели 2 и 3 уступает инерционному и климатологическому прогнозу по величине допустимой погрешности. Хорошо проявили себя в течение пяти лет проверки модели прогноза урожайности

картофеля по сельскохозяйственным предприятиям: все три модели оправдались по величине допустимой погрешности, по всем моделям прогноз оказался успешнее инерционного и климатологического. По величине относительной ошибки наилучший результат показала модель 1 прогноза урожайности картофеля по сельхозпредприятиям Иркутской области.

Решением Технического совета ФГБУ «Иркутское УГМС» от 20 апреля 2023 г. и решением ЦМКП от 29 мая 2023 г. Метод прогноза урожайности картофеля по всем категориям хозяйств Иркутской области (модель 1) и Метод прогноза урожайности картофеля по сельскохозяйственным предприятиям Иркутской области (модель 1) рекомендованы к внедрению с 1 августа 2023 г. в оперативную практику специалистов агрометеорологов Гидрометцентра ФГБУ «Иркутского УГМС» в качестве основного расчетного на срок 1–3 августа.

#### **Достоинства нового метода:**

1. Позволяет прогнозировать урожайность картофеля и валовой сбор.
2. Для выполнения расчетов создана и запущена полностью автоматизированная технология составления прогнозов и расчетов оценок.

#### **Список литературы**

1. *Пищимко О.И.* Прогнозирование урожайности картофеля / О.И. Пищимко, Л.В. Гарафутдинова // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. – 2022. – № 4 (69). – С. 15–22. – DOI 10.34655/bgsha.2022.69.4.002.
2. *Старостина Т.В., Кононенко С.М., Гусарова Т.Ю.* Результаты испытания методов прогноза урожайности картофеля, многолетних и однолетних трав по Омской области // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2019. – Информационный сборник № 46. – С. 56–59.
3. *Селянинов Г.Т.* О сельскохозяйственной оценке климата // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. – 1928. – Информационный сборник № 20. – С. 169–178.
4. РД 52.27.284–91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 150 с.

## **Методика краткосрочного и среднесрочного прогноза расходов и уровней воды на реках бассейна Дона**

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва*

### **Введение**

Для научно обоснованного планирования и эффективного проведения мероприятий по использованию водных ресурсов и защите населения от неблагоприятных и опасных явлений, связанных с водным режимом рек, важную гидрологическую информацию дают краткосрочные (с заблаговременностью до 5–6 суток) и среднесрочные (с заблаговременностью от 6–7 до 10–15 суток) прогнозы речного стока [10, 12–14].

Высокая населенность и хозяйственная освоенность бассейна Дона предъявляет особые требования к информации о текущем и ожидаемом состоянии водных объектов. Для рек этого региона прогнозы расходов и уровней воды необходимы для предупреждения о резких изменениях их водного режима (наводнениях, маловодьях), которые учитываются при проведении противопаводочных мероприятий, организации водоснабжения и судоходства, эксплуатации многочисленных гидротехнических сооружений, и прежде всего Цимлянской ГЭС [1, 6, 7].

Выбор методики прогнозирования должен осуществляться с учетом не только заблаговременности и точности выпускаемых с ее помощью прогнозов, но и с учетом трудоемкости их получения. Кроме того, целесообразно учитывать возможность использования этой методики в рамках автоматизированной системы подготовки и выпуска прогнозов и своевременного доведения прогностической информации до всех заинтересованных потребителей в удобном для них виде. Таким образом, при прочих равных условиях предпочтение следует отдавать более простым методикам прогнозирования [5].

Требованиям достаточно высокого качества прогнозов, простоты их получения и возможностям автоматизации подготовки и выпуска прогнозов отвечает предлагаемая методика краткосрочного и среднесрочного прогнозирования расходов и уровней воды на

реках бассейна Дона, разработанная в ФГБУ «Гидрометцентр России». В ее основе лежит разработанный там же метод экстраполяции гидрографа, а при разработке использованы данные гидрологических наблюдений за последние десятилетия, предоставленные ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС».

### **Общие сведения о бассейне реки Дон**

Бассейн реки Дон практически полностью расположен в пределах степной и лесостепной зон. Большая часть его территории занята сельскохозяйственными угодьями. Леса сохранились только на севере. Средняя за последние сто лет бассейна Дона температура июля варьирует от 20 °С на севере до 25 °С на юге, января – от -12 °С на севере до -4 °С на юге. Оттепели могут наблюдаться даже в январе. Снежный покров появляется в середине ноября на севере и в конце ноября – начале декабря на юге бассейна. Максимальная высота снежного покрова варьирует от 20–35 см на севере до 15–20 см на юге. Весна наступает в начале апреля на севере и в начале марта на юге. Лето продолжительное жаркое и сухое. Годовое количество осадков превышает 400 мм. Преобладают летние дожди, которые не оказывают заметного влияния на речной сток [9].

До начала 30-х годов условия формирования стока реки Дон и его притоков незначительно отличались от естественных. Доля снегового питания составляла 70 %, дождевого – менее 10 %, подземного – около 20 %. Было характерно высокое половодье и низкая межень в остальное время года. Осенние паводки были выражены слабо, летние – крайне редки [9].

В течение последних 100 лет в бассейне Дона отмечается потепление климата и увеличение его влажности. В наибольшей степени потепление климата повлияло на среднюю температуру воздуха холодного периода с ноября по март, которая возросла более чем на 2 °С. Повышение температуры холодного периода сопровождается увеличением суммы положительных температур за холодный период, влияет на частоту и продолжительность оттепелей. За последние 40 лет средние даты устойчивого перехода к отрицательным температурам воздуха и средние даты начала безморозного периода сместились в сторону более ранних чисел на 10–12 суток. За этот же период годовая сумма осадков возросла на 3 %, сумма осадков за холодный период возросла на 11 %. При этом, благодаря участвующим оттепелям, статистически достоверного увеличения запасов воды в снежном покрове на конец февраля пока не обнаружено [7].

Прямое антропогенное воздействие на речной сток оказывают безвозвратный забор воды на орошение, промышленное и коммунально-бытовое водоснабжение, а также строительство прудов, водохранилищ и каналов. К косвенным антропогенным факторам

хозяйственной деятельности, оказывающим влияние на условия формирования стока рек бассейна Дона, относятся агротехнические мероприятия, которые в целом приводят к его снижению, и урбанизация территории, приводящая к его незначительному увеличению. В целом, антропогенная нагрузка в бассейне Дона оценивается как очень высокая. До начала 90-х годов она имела тенденцию к увеличению, в последующие 10 лет она снизилась, для последних 20 лет характерна стабилизация [4, 5].

Начиная с 70-х годов под влиянием климатических и антропогенных факторов произошло снижение стока и выравнивание внутригодового распределения. В последние 20 лет произошла относительная стабилизация климатических и антропогенных факторов формирования стока рек бассейна Дона, поэтому заметное изменение водного режима рек бассейна Дона пока не отмечается [1, 4, 6, 7].

### Метод экстраполяции гидрографа

Метод экстраполяции гидрографа разработан в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» и предназначен для реализации в рамках автоматизированной системы подготовки и ежедневного выпуска прогнозов среднесуточных расходов и уровней воды в течение всего года [3, 5].

Метод основан на том, что характерный для достаточно крупных равнинных рек плавный ход ежедневных расходов воды дает возможность его экстраполяции на несколько суток вперед и определения прогноза с заблаговременностью  $\Delta t$  суток в виде обобщенного полинома. Оценка  $k+1$  параметров этого полинома по известным к дате составления прогноза  $t$  среднесуточным уровням воды, расходам воды  $Q(t)$ ,  $Q(t-1)$ , ...,  $Q(t-k)$  приводит к тому, что получаемый путем такой экстраполяции прогноз определяется формулой:

$$\hat{Q}(t + \Delta t) = \sum_{i=0}^k a_i(\Delta t) Q(t-i) + b(\Delta t). \quad (1)$$

Параметры  $a_0(\Delta t)$ ,  $a_1(\Delta t)$ , ...,  $a_k(\Delta t)$ ,  $b(\Delta t)$  и оптимальное значение  $k$  зависят от заблаговременности прогноза  $\Delta t$  и подлежат оценке по данным гидрологических наблюдений.

Определяемые формулой (1) величины  $\hat{Q}(t + \Delta t)$  могут принимать недопустимо высокие и низкие значения. Недопустимо высокие значения  $\hat{Q}(t + \Delta t)$  могут возникать при прогнозировании расходов воды на крутом подъеме половодья или паводка. Недопустимо

низкие и даже отрицательные значения  $\hat{Q}(t+\Delta t)$  могут возникать при прогнозировании расходов воды на крутом спаде половодья или паводка.

Во избежание необоснованно низких и высоких значений прогноза результаты применения формулы (1) корректируются путем замены экстремальных значений  $\hat{Q}(t+\Delta t)$  допустимым минимумом  $\min Q$  или максимумом  $\max Q$ . Окончательный прогноз уровня воды выражается формулой:

$$\tilde{Q}(t+\Delta t) = \begin{cases} \min Q, & \text{если } \hat{Q}(t+\Delta t) < \min Q; \\ \hat{Q}(t+\Delta t), & \text{если } \min Q \leq \hat{Q}(t+\Delta t) \leq \max Q; \\ \max Q, & \text{если } \hat{Q}(t+\Delta t) > \max Q. \end{cases} \quad (2)$$

Входящие в формулу (2) допустимые минимум  $\min Q$  и максимум  $\max Q$  значений расхода воды подлежат определению по всему имеющемуся для каждого речного створа ряду гидрологических наблюдений с использованием трехпараметрического гамма-распределения вероятностей и методов статистического оценивания, изложенных в работе [11]. Допустимый для прогноза минимум  $\min Q$  определяется как значение годового минимума среднесуточного расхода воды  $Q_{\min}(99\%)$ , соответствующее вероятности превышения (обеспеченности) 99 % и округленное до целой величины в меньшую сторону. Допустимый для прогноза максимум  $\max Q$  определяется как значение годового максимума среднесуточного расхода воды  $Q_{\max}(1\%)$ , соответствующее обеспеченности 1 % и округленное до целой величины в большую сторону. Подобная оценка величин  $\min Q$  и  $\max Q$  гарантирует, что в течение 10 последующих лет использования предлагаемой методики прогнозирования более низкие или более высокие значения расходов воды могут появиться с вероятностью, не превышающей 10 %.

Для ежедневного краткосрочного и среднесрочного прогнозирования среднесуточных уровней воды метод экстраполяции гидрографа применяется аналогичным образом. При заблаговременности прогноза  $\Delta t$  суток учитываются известные к дате составления прогноза  $t$  среднесуточные уровни воды  $H(t)$ ,  $H(t-1)$ , ...,  $H(t-k)$ , и предварительный прогноз определяется формулой:

$$\hat{H}(t+\Delta t) = \sum_{i=0}^k c_i(\Delta t)H(t-i) + d(\Delta t). \quad (3)$$

Параметры  $c_0(\Delta t)$ ,  $c_1(\Delta t)$ , ...,  $c_k(\Delta t)$ ,  $d(\Delta t)$  и оптимальное значение  $k$  зависят от заблаговременности прогноза  $\Delta t$  и подлежат оценке по данным гидрологических наблюдений.

Во избежание необоснованно низких и высоких значений прогноза  $\hat{H}(t + \Delta t)$  результаты применения формулы (3) корректируются путем замены экстремальных значений  $\hat{H}(t + \Delta t)$  допустимым минимумом  $\min H$  или максимумом  $\max H$ . Окончательный прогноз уровня воды выражается формулой:

$$\tilde{H}(t + \Delta t) = \begin{cases} \min H, & \text{если } \hat{H}(t + \Delta t) < \min H; \\ \hat{H}(t + \Delta t), & \text{если } \min H \leq \hat{H}(t + \Delta t) \leq \max H; \\ \max H, & \text{если } \hat{H}(t + \Delta t) > \max H. \end{cases} \quad (4)$$

Допустимый для прогноза минимум  $\min H$  определяется по данным многолетних гидрологических наблюдений как значение годового минимума среднесуточного уровня воды  $H_{\min}(99\%)$ , соответствующее вероятности превышения (обеспеченности) 99 %. Допустимый для прогноза максимум  $\max H$  определяется по данным многолетних гидрологических наблюдений как значение годового максимума среднесуточного уровня воды  $H_{\max}(1\%)$ , соответствующее обеспеченности 1 %.

В целях автоматизации процедуры получения прогнозов и оценки их качества для любого набора речных створов и соответствующих гидрологических постов, в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» на языке Python разработана компьютерная программа. Она включает следующие этапы:

- считывание и обработка данных, которые могут храниться в одном или в нескольких файлах;
- оценка параметров схемы получения прогноза для каждого речного створа;
- оценка показателей качества получаемых прогнозов;
- создание для каждого створа отдельной директории, в которой сохраняются параметры – схемы получения прогноза и показатели его качества;
- создание сводной таблицы с результатами прогнозирования [5].

Возможности использования метода экстраполяции гидрографа подтверждены достаточно успешным его применением для получения краткосрочных и среднесрочных прогнозов притока воды в Цимлянское водохранилище [4].

### **Получение методики**

Предлагаемая схема получения прогнозов среднесуточных расходов и уровней воды с заблаговременностью  $\Delta t = 1, \dots, 10$  суток основана на методе экстраполяции гидрографа и разработана для 18 створов, расположенных на реке Дон и его притоках различных

порядков. В табл. 1 для этих створов помещены номера гидрологических постов, значения площади водосбора  $A$  ( $\text{км}^2$ ), длины реки  $L$  (км) и среднего уклона реки  $I$  (‰).

Таблица 1

Основные характеристики рассматриваемых речных створов

Индекс	Река	Пост	$A$ , $\text{км}^2$	$L$ , км	$I$ , ‰
78004	Дон	г. Задонск	31100	302	0,05
78011	Дон	г. Лиски	69500	588	0,08
78016	Дон	х. Хованский	169000	1066	0,16
78017	Дон	г. Серафимович	204000	1086	0,17
78021	Дон	ст. Новогригорьевская	208000	1212	0,22
78054	Сосна	г. Елец	16300	259	0,24
78082	Воронеж	г. Липецк 2	15300	156	0,41
78087	Воронеж	с. Чертовицкое	21000	301	2,07
78111	Битюг	г. Бобров	7340	290	0,29
78138	Хопер	г. Балашов	14300	384	0,13
78141	Хопер	г. Поворино	19100	542	0,21
78142	Хопер	г. Новохоперск	34800	656	0,32
78146	Хопер	х. Барминский	57300	847	0,90
78164	Ворона	г. Уварово	9890	319	0,56
78202	Медведица	ст. Арчединская	33700	679	0,18
78334	Сев. Донец	г. Белая Калитва	80900	934	1,81
78504	Калитва	х. Погорелое	10500	288	0,28
78623	Сал	х. Балабинка	21000	730	3,48

Все необходимые данные гидрологических наблюдений в указанных створах были предоставлены ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС». Расположение рассматриваемых гидрологических постов и соответствующих им речных створов показано на рис. 1.

Параметры формулы (1) получения прогнозов расходов воды и формулы (3) получения прогнозов уровней воды оценивались методом наименьших квадратов по ряду ежедневных гидрологических наблюдений за период с 01.01.2011 по 31.12.2022. Оптимальные значения параметра  $k$ , при которых среднеквадратическая погрешность прогноза расходов и уровней воды принимает минимальное значение, не превышали 5. На этом основании все прогнозы определялись по формулам (1) и (3) при  $k = 5$ .

Параметры  $\min Q = Q_{\min}(99\%)$  и  $\max Q = Q_{\max}(1\%)$  в формуле (2) оценивались по рядам многолетних гидрологических наблюдений за период с 1985 по 2022 год с использованием трехпараметрического гамма-распределения.



Параметры формул (1) и (2) получения прогноза среднесуточных расходов воды  
в створе р. Дон – г. Серафимович.

$\Delta t$	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$b$	min $Q$	max $Q$
1	1,435	-0,309	-0,082	0,053	-0,048	-0,054	2,21	148	5531
2	1,746	-0,522	-0,068	0,015	-0,065	-0,118	5,48	148	5531
3	1,981	-0,605	-0,129	0,02	-0,169	-0,117	9,41	148	5531
4	2,236	-0,740	-0,143	-0,068	-0,199	-0,116	13,84	148	5531
5	2,462	-0,829	-0,255	-0,099	-0,141	-0,178	18,90	148	5531
6	2,689	-1,007	-0,309	-0,048	-0,128	-0,249	24,57	148	5531
7	2,829	-1,126	-0,282	-0,046	-0,105	-0,335	30,87	148	5531
8	2,898	-1,136	-0,299	-0,044	-0,064	-0,435	37,65	148	5531
9	2,977	-1,168	-0,309	-0,025	-0,050	-0,52	44,75	148	5531
10	3,116	-1,208	-0,315	-0,037	-0,027	-0,658	60,09	148	5531

### Верификация прогнозов

Качество краткосрочных и среднесрочных прогнозов среднесуточных расходов и уровней воды оценивалось на независимом материале, то есть по данным, которые не учитывались при определении параметров формул получения прогноза. С этой целью использована следующая процедура скользящего контроля [2].

1. Из 12-летнего периода наблюдений исключался первый год.
2. Данные за оставшиеся 11 лет использовались для оценки параметров схемы получения прогноза.
3. Полученные оценки подставлялись в формулы (1) и (2) для прогнозирования расходов или в формулы (3) и (4) для прогнозирования уровней воды в течение исключенного года.
4. В результате для исключенного года формировался полученный на независимом материале ряд ошибок прогноза за 365 или 366 суток для високосного года.
5. Данные за исключенный первый год возвращались, и исключался следующий год.
6. После повторения описанной процедуры для всех 12 лет формировался ряд ошибок прогноза длиной  $N = 4383$ , полученный на независимом материале.

Если обозначить через  $Y(t)$  фактическое значение расхода или уровня воды за сутки  $t$ , а через  $\tilde{Y}(t)$  его прогноз, то для периода с 01.01.2011 по 31.12.2022 среднеквадратическая погрешность прогноза определяется формулой:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [Y(t) - \tilde{Y}(t)]^2} . \quad (5)$$

В соответствии с Наставлением по службе прогнозов [8], для оценки эффективности методики прогнозирования в качестве альтернативы использовался инерционный прогноз. При заблаговременности прогноза  $\Delta t$  суток инерционный прогноз  $\tilde{Y}_t(t)$  использует известное на дату его составления  $t - \Delta t$  значение  $Y(t - \Delta t)$  и определяется формулой:

$$\tilde{Y}_t(t) = Y(t - \Delta t) + \bar{\Delta} , \quad (6)$$

где  $\bar{\Delta}$  вычисляется как среднее арифметическое ряда  $\Delta_1, \dots, \Delta_N$ , образованного  $N$  наблюдавшимися изменениями рассматриваемой характеристики за период заблаговременности прогноза. Оценка погрешности инерционного прогноза определяется формулой:

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta_i - \bar{\Delta})^2} . \quad (7)$$

Вывод о применимости методики прогнозирования делается на основании отношения  $S/\sigma_{\Delta}$ : при достаточно большом числе  $N$  проверочных прогнозов методика считается хорошей при  $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,50$ ; удовлетворительной при  $0,50 < S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$  и неудовлетворительной при  $S/\sigma_{\Delta} > 0,80$  [8].

В качестве другого показателя качества прогнозирования используется оправдываемость прогноза  $P$ , то есть частота случаев, когда абсолютные значения ошибок прогноза не превышали допустимую ошибку, равную  $0,674 \sigma_{\Delta}$ .

В Наставлении по службе прогнозов [8] критическим значениям 0,50 и 0,80 показателя  $S/\sigma_{\Delta}$  соответствуют значения оправдываемости  $P = 82,5 \%$  и  $P = 60 \%$  [2].

В качестве примера в табл. 3 для прогнозов среднесуточных уровней воды в створе р. Дон – г. Серафимович с заблаговременностью  $\Delta t = 1, \dots, 10$  суток приведены следующие показатели качества прогнозирования:

$R$  – коэффициент корреляции между фактическими расходами и их прогнозами;

$S$  – среднеквадратическая погрешность прогнозов, м<sup>3</sup>/с;

$\sigma_{\Delta}$  – среднеквадратическая погрешность инерционных прогнозов, м<sup>3</sup>/с;

$S/\sigma_{\Delta}$  – показатель эффективности прогнозов;

$P$  – оправдываемость прогнозов.

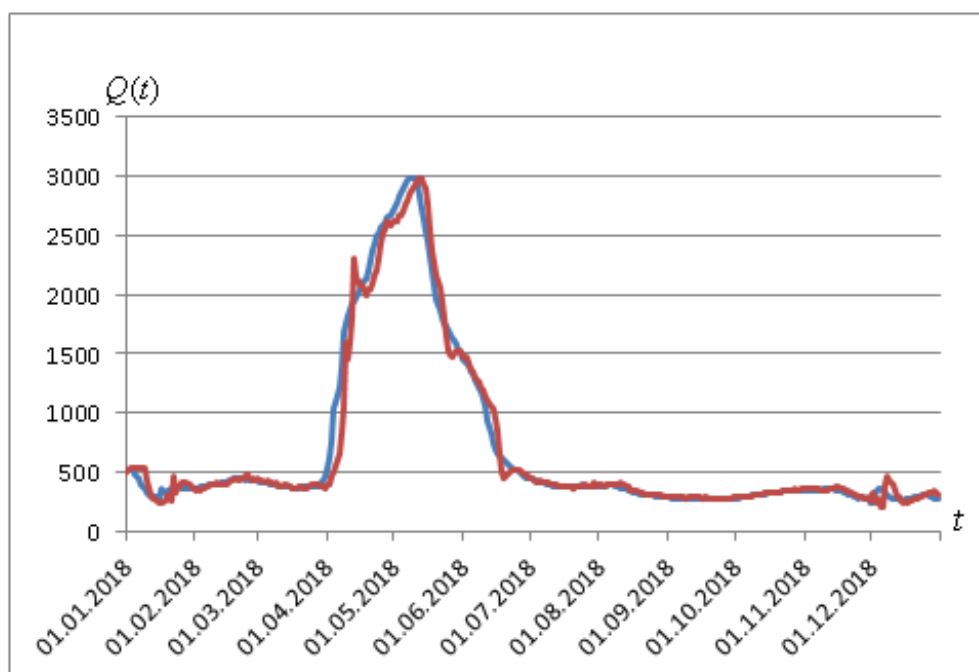
На рис. 2 для этого створа приведены совмещенные графики хода фактических и спрогнозированных с заблаговременностью  $\Delta t = 5$  суток расходов воды в 2018 году.

Появившиеся на спрогнозированном гидрографе незначительные всплески обусловлены интенсивным ростом расходов воды перед датой составления прогноза.

Таблица 3

Показатели качества прогнозов среднесуточных уровней воды в створе  
р. Дон – г. Серафимович

$\Delta t$	$R$	$S$	$\sigma_{\Delta}$	$S/\sigma_{\Delta}$	$P$
1	0,9995	22,3	38,3	0,58	91%
2	0,998	41,8	72,7	0,58	86%
3	0,996	63,0	106	0,59	85%
4	0,993	84,1	139	0,61	84%
5	0,989	109	171	0,64	84%
6	0,983	134	202	0,66	85%
7	0,975	160	232	0,69	83%
8	0,967	185	260	0,71	84%
9	0,957	209	288	0,72	83%
10	0,937	253	341	0,74	83%



**Рис. 2.** Фактический (синим) и спрогнозированный с заблаговременностью  $\Delta t = 5$  суток (красным) ход среднесуточных расходов воды в створе р. Дон – г. Серафимович в 2018 году.

### Анализ результатов верификации прогнозов

Для всех случаев, когда соотношение  $S/\sigma_{\Delta}$  не превышало 0,80, оправдываемость таких прогнозов  $P$  превышала 75 %. Следовательно, соотношение  $S/\sigma_{\Delta}$  в достаточной степени характеризует удовлетворительность прогнозов расходов и уровней воды.

В табл. 4 помещены значения показателя  $S/\sigma_{\Delta}$  прогнозов среднесуточных расходов воды для всех рассматриваемых речных створов бассейна Дона. Для неудовлетворительных прогнозов с показателем  $S/\sigma_{\Delta} > 0,80$  поставлен прочерк.

Таблица 4

Значения показателя  $S/\sigma_{\Delta}$  прогнозов среднесуточных расходов воды  
при заблаговременности  $\Delta t = 1, \dots, 10$  суток

Индекс	Река	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
78004	Дон	0,61	0,75	0,80	–	–	–	–	–	–	–
78011	Дон	0,53	0,65	0,72	0,76	0,79	–	–	–	–	–
78016	Дон	0,74	0,72	0,74	0,77	0,79	0,8	–	–	–	–
78017	Дон	0,58	0,58	0,59	0,61	0,64	0,66	0,69	0,71	0,72	0,74
78021	Дон	0,72	0,74	0,75	0,75	0,76	0,77	0,78	0,79	0,79	0,79
78054	Сосна	0,66	0,79	–	–	–	–	–	–	–	–
78082	Воронеж	0,58	0,67	0,73	0,79	0,80	–	–	–	–	–
78087	Воронеж	0,47	0,61	0,67	0,74	0,78	0,80	–	–	–	–
78111	Битюг	0,46	0,55	0,64	0,74	0,79	–	–	–	–	–
78138	Хопер	0,49	0,55	0,62	0,67	0,71	0,73	0,75	0,76	0,77	0,78
78141	Хопер	0,43	0,48	0,56	0,63	0,68	0,71	0,74	0,76	0,77	0,79
78142	Хопер	0,57	0,58	0,59	0,6	0,62	0,64	0,66	0,67	0,69	0,70
78146	Хопер	0,48	0,55	0,61	0,67	0,72	0,74	0,76	0,78	0,79	0,80
78164	Ворона	0,38	0,51	0,60	0,66	0,71	0,74	0,76	0,79	–	–
78202	Медведица	0,53	0,61	0,67	0,72	0,76	0,79	–	–	–	–
78334	Сев. Донец	0,75	0,79	–	–	–	–	–	–	–	–
78504	Калитва	0,61	0,68	0,74	0,78	–	–	–	–	–	–
78623	Сал	0,46	0,55	0,64	0,71	0,76	0,79	0,80	–	–	–

Верификация прогнозов расходов воды по предлагаемой методике показала следующие результаты.

1. Оправдываемость  $P$  всех прогнозов достаточно высокая, закономерно снижается с ростом заблаговременности прогноза и при  $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$  варьирует в пределах от 83 % до 98 %.

2. Максимальная заблаговременность прогнозов, удовлетворительных по показателю  $S/\sigma_{\Delta}$ , варьирует от 2 до 10 суток и в среднем превышает 6 суток.

В табл. 5 помещены значения показателя  $S/\sigma_{\Delta}$  прогнозов среднесуточных уровней воды для всех рассматриваемых речных створов бассейна Дона. Для неудовлетворительных прогнозов с показателем  $S/\sigma_{\Delta} > 0,80$  также поставлен прочерк.

Верификация прогнозов уровней воды по предлагаемой методике показала следующие результаты.

1. Оправдываемость  $P$  всех прогнозов достаточно высокая, закономерно снижается с ростом заблаговременности прогноза и при  $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$  варьирует в пределах от 75 % до 96 %.

2. Максимальная заблаговременность прогнозов, удовлетворительных по показателю  $S/\sigma_{\Delta}$ , варьирует от 1 до 10 суток и в среднем превышает 5 суток.

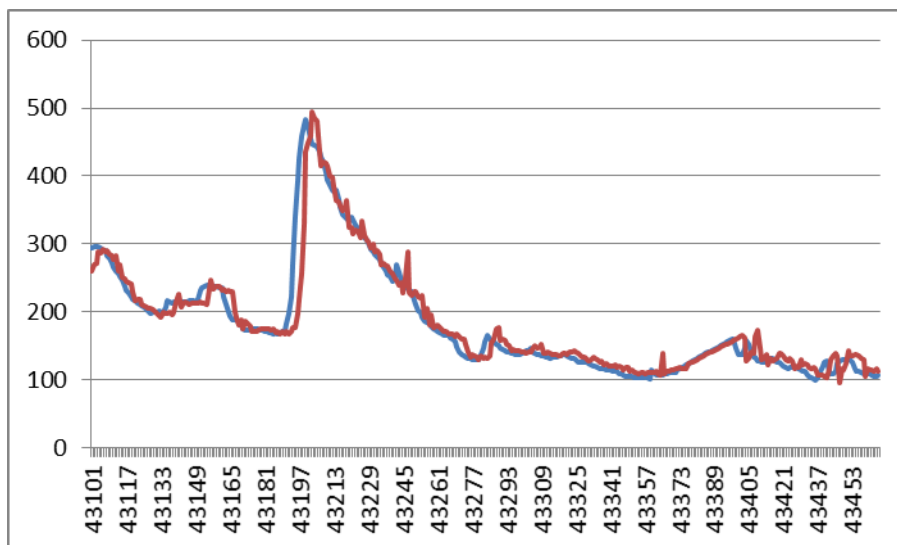
Таблица 5

Значения показателя  $S/\sigma_{\Delta}$  прогнозов среднесуточных уровней воды при заблаговременности  $\Delta t = 1, \dots, 10$  суток

Индекс	Река	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
78004	Дон	0,59	0,71	0,76	–	–	–	–	–	–	–
78011	Дон	0,7	0,76	0,80	0,80	0,80	–	–	–	–	–
78016	Дон	0,73	0,72	0,74	0,75	0,76	0,77	–	–	–	–
78017	Дон	0,75	0,73	0,74	0,75	0,77	0,78	0,79	0,80	0,80	–
78021	Дон	0,77	0,78	0,75	0,78	0,77	0,77	0,76	0,75	0,75	0,76
78054	Сосна	0,6	0,7	–	–	–	–	–	–	–	–
78082	Воронеж	0,63	0,71	0,76	0,80	–	–	–	–	–	–
78087	Воронеж	0,73	0,76	0,79	0,80	–	–	–	–	–	–
78111	Битюг	0,57	0,69	0,75	0,8	–	–	–	–	–	–
78138	Хопер	0,41	0,52	0,62	0,69	0,73	0,76	0,78	0,79	0,81	0,81
78141	Хопер	0,50	0,57	0,59	0,6	0,62	0,65	0,66	0,67	0,68	0,68
78142	Хопер	0,50	0,53	0,57	0,6	0,62	0,65	0,66	0,67	0,68	0,69
78146	Хопер	0,54	0,65	0,71	0,74	0,75	0,75	0,75	0,76	0,78	0,79
78164	Ворона	0,47	0,59	0,66	0,71	0,74	0,75	0,75	0,75	–	–
78202	Медведица	0,64	0,71	0,73	0,77	0,80	–	–	–	–	–
78334	Сев. Донец	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
78504	Калитва	0,64	0,72	0,77	0,80	–	–	–	–	–	–
78623	Сал	0,51	0,59	0,66	0,72	0,76	0,78	0,80	–	–	–

Качество прогнозов уровней воды в целом несколько ниже качества прогнозов расходов воды. Это обусловлено тем, что благодаря более плавному ходу среднесуточных уровней в течение каждого года они прогнозируются лучше, чем расходы воды [10, 12, 13]. Однако более плавный ход уровней приводит к малым значениям погрешности инерционного прогноза  $\sigma_{\Delta}$ , в результате чего показатели  $S/\sigma_{\Delta}$  становятся больше, а оправдываемость прогнозов  $P$  – меньше.

В связи с этим необходимо отметить, что неудовлетворительно высокое значение  $S/\sigma_{\Delta}$  отнюдь не означает низкую точность прогноза. В качестве примера можно привести прогноз уровней воды в створе р. Воронеж – г. Липецк 2. При заблаговременности  $\Delta t = 5$  суток показатель  $S/\sigma_{\Delta}$  равен 0,89, то есть в соответствии с Наставлением по службе прогнозов [8] такие прогнозы оказались неудовлетворительными. В то же время связь между фактическими и прогнозируемыми с заблаговременностью 5 суток уровнями воды весьма тесная и характеризуется коэффициентом корреляции  $R = 0,94$ . Столь высокой корреляции соответствует хорошее совпадение фактического и спрогнозированного хода уровней воды, которое демонстрирует рис. 3.



**Рис. 3.** Фактический (синим) и спрогнозированный с заблаговременностью  $\Delta t = 5$  суток (красным) ход уровней воды в створе р. Воронеж – г. Липецк 2 в 2018 году.

### Заключение

В отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» для рек бассейна Дона разработана методика ежедневного прогнозирования среднесуточных расходов и уровней воды с заблаговременностью 1–10 суток в течение всего года. Методика основана на данных гидрологических наблюдений за период с 1985 по 2022 год.

В основе методики лежит метод экстраполяции гидрографа, в котором учитываются расходы и уровни воды за дату составления прогноза и за 5 предыдущих суток. Оценка параметров методики выполняется с помощью статистического анализа данных гидрологических наблюдений для каждого речного створа. В целях автоматизации процедуры получения прогнозов и оценки их качества разработана компьютерная программа на языке Python.

Проверка прогнозов, выполненная на независимом материале методом скользящего контроля, показала, что предлагаемая методика в целом дает удовлетворительные результаты прогнозирования. Удовлетворительные прогнозы среднесуточных расходов воды с показателем  $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$  и оправдываемостью  $P > 75\%$  при заблаговременности 1 сутки получены для всех 18 речных створов, при заблаговременности 4 суток – для 15 створов, при заблаговременности 7 суток – для 8 створов и при заблаговременности 10 суток – для 6 речных створов. Удовлетворительные прогнозы среднесуточных уровней воды при заблаговременности 1 сутки получены для 17 речных створов, при заблаговременности 4 суток – для 15 створов, при заблаговременности 7 суток – для 8 створов и при заблаговременности 10 суток – для 5 речных створов.

Качество прогнозов уровней воды в целом несколько ниже качества прогнозов расходов воды. Это обусловлено более плавным ходом уровней воды, при котором более высокая точность их экстраполяции сочетается с меньшей погрешностью альтернативного инерционного прогноза. В результате показатель  $S/\sigma_{\Delta}$  становится больше, а оправдываемость прогнозов  $P$  – меньше.

Методика может быть использована в рамках автоматизированной системы подготовки и выпуска прогнозов в целях обеспечения необходимой прогностической информацией оперативных решений по использованию водных ресурсов рек бассейна Дона и защите населения от опасных наводнений.

Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета 25.12.2023 принято решение внедрить предлагаемую методику краткосрочного и среднесрочного прогноза расходов и уровней воды на реках бассейна Дона в качестве основной методики прогнозирования.

### Список литературы

1. Болгов М.В., Мишон В.М., Сенцова Н.И. Современные проблемы оценки водных ресурсов и водообеспечения. – М.: Наука, 2005. – 317 с.
2. Борщ С.В., Христофоров А.В. Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. –2015. – Специальный выпуск 355. – 198 с.

3. Борщ С.В., Колий В.М., Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Прогнозирование стока рек России методом экстраполяции гидрографа // Гидрологические исследования и прогнозы. – 2021. – № 2 (380). – С. 77–94.
4. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Прогнозирование притока воды в Цимлянское водохранилище // Гидрологические исследования и прогнозы. – 2024. – № 4 (386). – С. 47–63.
5. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Прогнозирование стока рек России. – М.: Гидрометцентр России, 2023. – 200 с.
6. Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П., Кашутина Е.А., Барабанова Е.А., Вишневецкая И.А., Бородина О.О. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Часть 2. Бассейны рек Волги и Дона. – М.: МАКС Пресс, 2014. – 214 с.
7. Джамалов Р.Г., Киреева М.Б., Косолапов А.Е., Фролова Н.Л. Водные ресурсы бассейна Дона и их экологическое состояние. – М.: ГЕОС, 2017. – 204 с.
8. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 1. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 193 с.
9. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 7. Донской район / Под ред. Д.Д. Мордухай-Болтовского. – Л.: Гидрометеиздат, 1964. – 267 с.
10. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 245 с.
11. Христофоров А.В., Юмина Н.М. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: АПР, 2017. – 151 с.
12. Adams T.E., Pagano T.C. Flood Forecasting: A Global Perspective. – London: Academic Press, 2016. – 480 p.
13. Greco M., Cravetta A., Della Morte R. River flow. – London: Taylor and Francis Group, 2004. – 1024 p.
14. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices // WMO-No. 168. – 2009. – 302 p.

## **Методика краткосрочного и среднесрочного прогноза уровней воды на реках бассейна Тобола**

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва*

### **Введение**

Краткосрочные с заблаговременностью до 5–6 суток и среднесрочные с заблаговременностью от 6–7 до 10–15 суток прогнозы речного стока дают гидрологическую информацию, необходимую для научно обоснованного планирования и эффективного проведения мероприятий по использованию водных ресурсов и защите населения от неблагоприятных и опасных явлений, связанных с водным режимом рек [9, 11–13].

Для рек бассейна Тобола прогнозы уровней воды необходимы для предупреждения о резких изменениях их водного режима (наводнениях, маловодьях), которые учитываются при проведении противопаводочных мероприятий, организации судоходства и лесосплава, использования водных ресурсов многочисленных прудов и водохранилищ сезонного регулирования [6, 8].

При выборе методики прогнозирования, помимо заблаговременности и точности выпускаемых с ее помощью прогнозов, необходимо учитывать трудоемкость их получения, а также возможность использования этой методики в рамках автоматизированной системы подготовки и выпуска прогнозов и своевременного доведения прогностической информации до всех заинтересованных потребителей в удобном для них виде. Таким образом, при прочих равных условиях предпочтение следует отдавать более простым методикам прогнозирования [5].

Именно требованиям достаточно высокого качества прогнозов и простоты их получения отвечает предлагаемая методика краткосрочного и среднесрочного прогнозирования уровней воды на реках бассейна Тобола, разработанная в ФГБУ «Гидрометцентр России». В ее основе лежит разработанный там же метод экстраполяции гидрографа, а при разработке использованы данные гидрологических наблюдений за последние десятилетия, предоставленные ФГБУ «Уральское УГМС».

## Общие сведения о бассейне Тобола

Река Тобол является левым и самым многоводным притоком Иртыша. Длина реки 1591 км, площадь водосбора 426 000 км<sup>2</sup>, средний расход воды 805 м<sup>3</sup>/с. Берет начало в Оренбургской области на границе восточных отрогов Южного Урала и Тургайской Столовой страны, далее течет по территории Республики Казахстан. Среднее и нижнее течение реки в пределах Западно-Сибирской равнины. Крупнейшие притоки слева – Уй, Исеть, Тура, Тавда, справа – Убаган.

Питание в основном снеговое, вниз по течению возрастает доля дождевого питания. Половодье с 1-й половины апреля до середины июня в верховьях и до начала августа в низовьях. Замерзает в низовьях в конце октября – ноябре, в верховьях в ноябре, вскрывается во 2-й половине апреля – 1-й половине мая [8].

Основная часть бассейна расположена в таежной зоне. Верховья левых притоков Тобола расположены в горно-таежной зоне, южная часть бассейна реки Миасс расположена в лесостепной зоне. Годовая сумма осадков составляет 800–900 мм на Среднем Урале, 1200–1500 мм на Южном Урале, на равнинной части осадки снижаются до 500–600 мм в таежной зоне и до 350–400 мм в лесостепной. Средняя годовая температура от -2 °С до +1,5 °С. В горных районах температура снижается с высотой на 0,5–0,7 °С на 100 метров подъема. В холодный период градиент температуры меньше, чем в теплый. Заболоченность достигает 50 % на севере и к югу резко снижается. Озерность в среднем оставляет 5–6 % [1].

Сток малых рек зарегулирован прудами и водохранилищами сезонного регулирования. Наиболее крупными являются Аргазинское водохранилище на р. Миасс, Белоярское на р. Пышма и Исетское на р. Исеть. На территории Казахстана сток Верхнего Тобола зарегулирован каскадом водохранилищ – Желкуарским, Верхнетобольским, Каратамарским, Сергеевским и Амангельдинским [6].

## Метод экстраполяции гидрографа

Метод экстраполяции гидрографа разработан в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» и предназначен для реализации в рамках автоматизированной системы подготовки и ежедневного выпуска прогнозов расходов и уровней воды в течение всего года [3, 5].

Метод основан на том, что характерный для достаточно крупных равнинных рек плавный ход ежедневных уровней воды дает возможность его экстраполяции на несколько суток вперед и определения прогноза с заблаговременностью  $\Delta t$  суток в виде обобщенного полинома. Оценка  $k+1$  параметров этого полинома по известным к дате составления

прогноза  $t$  среднесуточным уровням воды  $H(t), H(t-1), \dots, H(t-k)$  приводит к тому, что получаемый путем такой экстраполяции прогноз определяется формулой:

$$\hat{H}(t+\Delta t) = \sum_{i=0}^k a_i(\Delta t)H(t-i) + b(\Delta t). \quad (1)$$

Параметры  $a_0(\Delta t), a_1(\Delta t), \dots, a_k(\Delta t), b(\Delta t)$  и оптимальное значение  $k$  зависят от заблаговременности прогноза  $\Delta t$  и подлежат оценке по данным гидрологических наблюдений.

Определяемые формулой (1) величины  $\hat{H}(t+\Delta t)$  могут принимать недопустимо высокие и низкие значения. Недопустимо высокие значения  $\hat{H}(t+\Delta t)$  могут возникать при прогнозировании уровней воды на крутом подъеме половодья или паводка. Недопустимо низкие и даже отрицательные значения  $\hat{H}(t+\Delta t)$  могут возникать при прогнозировании уровней воды на крутом спаде половодья или паводка.

Во избежание необоснованно низких и высоких значений прогноза результаты применения формулы (1) корректируются путем замены экстремальных значений  $\hat{H}(t+\Delta t)$  допустимым минимумом  $\min H$  или максимумом  $\max H$ . Окончательный прогноз уровня воды выражается формулой:

$$\tilde{H}(t+\Delta t) = \begin{cases} \min H, & \text{если } \hat{H}(t+\Delta t) < \min H; \\ \hat{H}(t+\Delta t), & \text{если } \min H \leq \hat{H}(t+\Delta t) \leq \max H; \\ \max H, & \text{если } \hat{H}(t+\Delta t) > \max H. \end{cases} \quad (2)$$

Входящие в формулу (2) допустимые минимум  $\min H$  и максимум  $\max H$  значений уровня воды подлежат определению по всему имеющемуся для каждого речного створа ряду гидрологических наблюдений с использованием трехпараметрического гамма-распределения вероятностей и методов статистического оценивания, изложенных в работе [9]. Допустимый для прогноза минимум  $\min H$  определяется как значение годового минимума среднесуточного уровня воды  $H_{\min}(99\%)$ , соответствующее вероятности превышения (обеспеченности) 99 % и округленное до целой величины в меньшую сторону. Допустимый для прогноза максимум  $\max H$  определяется как значение годового максимума среднесуточного уровня воды  $H_{\max}(1\%)$ , соответствующее обеспеченности 1 % и округленное до целой величины в большую сторону. Подобная оценка величин  $\min H$  и  $\max H$  гарантирует, что в течение десяти последующих лет использования предлагаемой методики прогнозирования более низкие или более высокие значения расходов воды могут появиться с вероятностью, не превышающей 10 %.

В целях автоматизации процедуры получения прогнозов и оценки их качества для любого набора речных створов и соответствующих гидрологических постов, в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» на языке Python разработана компьютерная программа. Она включает следующие этапы:

- считывание и обработка данных, которые могут храниться в одном или в нескольких файлах;
- оценка параметров схемы получения прогноза для каждого речного створа;
- оценка показателей качества получаемых прогнозов;
- создание для каждого створа отдельной директории, в которой сохраняются параметры – схемы получения прогноза и показатели его качества;
- создание сводной таблицы с результатами прогнозирования [5].

### Получение методики

Предлагаемая схема получения прогнозов среднесуточных уровней воды с заблаговременностью  $\Delta t = 1, \dots, 10$  суток основана на методе экстраполяции гидрографа и разработана для 64 створов, расположенных на реке Тобол и его притоках различных порядков. В табл. 1 для этих створов помещены номера гидрологических постов, название реки, пункта и площадь водосбора  $A$  км<sup>2</sup>.

94

Все необходимые данные гидрологических наблюдений в указанных створах были предоставлены ФГБУ «Уральское УГМС». Расположение рассматриваемых гидрологических постов и соответствующих им речных створов показано на рис. 1.

Параметры формулы (1) оценивались методом наименьших квадратов по ряду ежедневных гидрологических наблюдений за период с 01.01.2010 по 31.12.2022. Оптимальные значения параметра  $k$ , при которых среднеквадратическая погрешность прогноза принимает минимальное значение, не превышали 5. На этом основании все прогнозы определялись по формуле (1) при  $k = 5$ . Параметры  $\min H = H_{\min}$  (99%) и  $\max H = H_{\max}$  (1%) формулы (2) оценивались по рядам многолетних гидрологических наблюдений за период с 1985 по 2022 год.

В качестве примера в табл. 2 приведены параметры формул (1) и (2) для получения прогнозов среднесуточных уровней воды в створе на реке Тавда у города Тавда с заблаговременностью  $\Delta t = 1, \dots, 10$  суток.

## Основные характеристики рассматриваемых речных створов

Номер	Река	Пункт	$A$ км <sup>2</sup>	Номер	Река	Пункт	$A$ км <sup>2</sup>
12010	Тобол	Звериноголовское	143000	12346	Реж	Ключи	4400
12014	Тобол	Курган	159000	12354	Бобровка	Липовское	101
12017	Тобол	Упорово	177000	12383	Пышма	Богандинское	18600
12018	Тобол	Ялуторовск	241000	12401	Юрмыч	Пышма	935
12022	Тобол	Иевлево	333000	12402	Беляковка	Потаскуева	1700
12040	Уй	Степное	3600	12407	Иска	Велижаны	895
12043	Уй	Троицкий свх	7660	12412	Тавда	Таборы	74200
12059	Увелька	Красосельское	3620	12413	Тавда	Тавда	81000
12061	Увелька	Карсинский зсх	5100	12415	Тавда	Н. Тавда	86100
12092	Юргамыш	Пертовское	1950	12417	Лозьва	Першино	6530
12098	Емуртла	Емуртла	3250	12422	Ивдель	Ивдель	2250
12101	Ук	Заводоуковск	917	12430	Сосьва	Денежкино	4390
12115	Исеть	Колюткино	3500	12434	Сосьва	Сосьва	22100
12123	Исеть	Катайск	12800	12435	Сосьва	Гари	23600
12125	Исеть	Шадринск	23400	12476	Вагран	Североуральск	1430
12127	Исеть	Мехонское	52300	12498	Турья	Карпинск	480
12129	Исеть	исетское	56000	12511	Сотрина	Сотрино	403
12136	Решетка	Новоалексеевское	32	12517	Лобва	Лобва	2940
12155	Синара	Верхнеключевское	5000	12528	Карабашка	Карабашка	648
12189	Миасс	Новоандреевка	1830	12554	Тобол	Кокино	172000
12202	Миасс	Каргополье	21400	12606	Бочанка	Заводопетровское	678
12222	Ирюм	Бобылево	778	12611	Сосьва	Морозково	11500
12238	Тура	Санкино	23000	12613	Караталаят	Карталы	659
12239	Тура	Туринск	29000	12614	Кунара	Быкова	380
12240	Тура	Туринская сл.	31500	12615	Исеть	Долматово	13100
12244	Тура	Тюмень ЦГМС	58500	12617	Н. Алабуга	Плотниково	456
12248	Тура	Покровское	80200	12620	Суерь	Волосниково	10300
12279	Тагил	Трошкова	7920	12631	Уй	Усть-Уйское	34400
12305	Мугай	Топоркова	1400	12632	Ирбит	Зайково	3320
12315	Ница	Ирбит	17300	12646	Каква	Каквинское	716
12316	Ница	Краснослободское	22000	12651	Пышма	Талица	11200
12320	Нейва	Черемшанка	1860	12652	Нейва	Кировское	5240

Карта-схема  
 расположения наблюдательных подразделений (НП)  
 на бассейнах рек Свердловской, Челябинской,  
 Курганской областей



Рис. 1. Расположение рассматриваемых гидрологических постов  
 в бассейне Тобола.

Параметры формул (1) и (2) получения прогноза среднесуточных уровней воды  
в створе р. Тавда – г. Тавда

$\Delta t$	$a_0(\Delta t)$	$a_1(\Delta t)$	$a_2(\Delta t)$	$a_3(\Delta t)$	$a_4(\Delta t)$	$a_5(\Delta t)$	$b(\Delta t)$	min $H$	max $H$
1	1,531	0,000	-0,578	0,000	0,000	0,045	0,5	93	883
2	2,010	0,000	-1,091	0,000	0,000	0,076	1,6	93	883
3	2,450	0,000	-1,556	0,000	0,000	0,097	3,0	93	883
4	2,870	0,000	-2,007	0,000	0,000	0,123	4,9	93	883
5	3,274	0,000	-2,450	0,000	0,000	0,154	7,0	93	883
6	3,666	0,000	-2,891	0,000	0,000	0,196	9,5	93	883
7	4,046	0,000	-3,331	0,000	0,000	0,246	12,3	93	883
8	4,401	0,000	-3,745	0,000	0,000	0,296	15,3	93	883
9	4,715	0,000	-4,108	0,000	0,000	0,334	18,7	93	883
10	4,985	0,000	-4,414	0,000	0,000	0,359	22,3	93	883

Значения коэффициентов  $a_1(\Delta t)$ ,  $a_3(\Delta t)$  и  $a_4(\Delta t)$  оказались нулевыми вследствие их округления.

### Верификация прогнозов

Качество краткосрочных и среднесрочных прогнозов среднесуточных уровней воды оценивалось на независимом материале, то есть по данным, которые не учитывались при определении параметров формул получения прогноза. С этой целью использована следующая процедура скользящего контроля [2].

1. Из 13-летнего периода наблюдений исключался первый год.
2. Данные за оставшиеся 12 лет использовались для оценки параметров схемы получения прогноза.
3. Полученные оценки подставлялись в формулы (1) и (2) для прогнозирования уровней воды в течение исключенного года.
4. В результате для исключенного года формировался полученный на независимом материале ряд ошибок прогноза за 365 или за 366 суток для високосного года.
5. Данные за исключенный первый год возвращались, и исключался следующий год.
6. После повторения описанной процедуры для всех 13 лет формировался ряд ошибок прогноза длиной  $N = 4748$ , полученный на независимом материале.

Если обозначить через  $H(t)$  значение уровня воды за сутки  $t$ , а через  $\tilde{H}(t)$  ее прогноз, то для периода с 01.01.2010 по 31.12.2022 среднеквадратическая погрешность прогноза определяется формулой:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [H(t) - \tilde{H}(t)]^2}. \quad (3)$$

В соответствии с Наставлением по службе прогнозов [7] для оценки эффективности методики прогнозирования в качестве альтернативы использовался инерционный прогноз. При заблаговременности прогноза  $\Delta t$  суток инерционный прогноз  $\tilde{H}_I(t)$  использует известное на дату его составления  $t - \Delta t$  значение  $H(t - \Delta t)$  и определяется формулой:

$$\tilde{H}_I(t) = H(t - \Delta t) + \bar{\Delta}, \quad (4)$$

где  $\bar{\Delta}$  вычисляется как среднее арифметическое ряда  $\Delta_1, \dots, \Delta_N$ , образованного  $N$  наблюдавшимися изменениями рассматриваемой характеристики за период заблаговременности прогноза. Оценка погрешности инерционного прогноза определяется формулой:

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}. \quad (5)$$

Вывод о применимости методики прогнозирования делается на основании отношения  $S/\sigma_{\Delta}$ : при достаточно большом числе  $N$  проверочных прогнозов методика считается хорошей при  $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,50$ , удовлетворительной при  $0,50 < S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$  и неудовлетворительной при  $S/\sigma_{\Delta} > 0,80$  [7].

В качестве другого показателя качества прогнозирования используется оправдываемость прогноза  $P$ , то есть частота случаев, когда абсолютные значения ошибок прогноза не превышали допустимую ошибку, равную  $0,674 \sigma_{\Delta}$ .

В Наставлении по службе прогнозов [7] критическим значениям 0,50 и 0,80 показателя  $S/\sigma_{\Delta}$  соответствуют значения оправдываемости  $P = 82,5 \%$  и  $P = 60 \%$  [7].

В качестве примера в табл. 3 для прогнозов среднесуточных уровней воды в створе р. Тавда – г. Тавда с заблаговременностью  $\Delta t = 1, \dots, 10$  суток приведены следующие показатели качества прогнозирования:

$R$  – коэффициент корреляции между фактическими расходами и их прогнозами;

$S$  – среднеквадратическая погрешность прогнозов, см;

$\sigma_{\Delta}$  – среднеквадратическая погрешность инерционных прогнозов, см;

$S/\sigma_{\Delta}$  – показатель эффективности прогнозов;

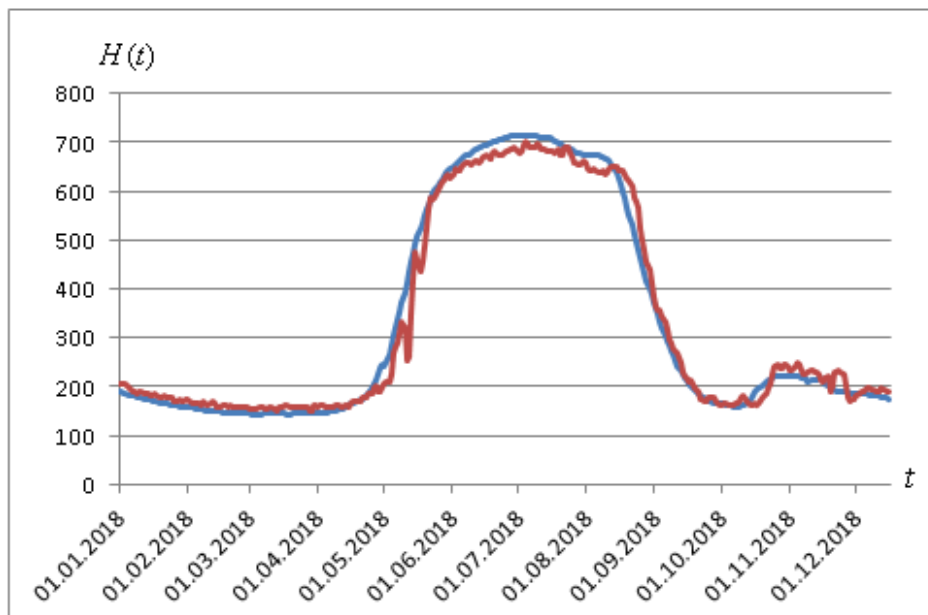
$P$  – оправдываемость прогнозов.

Показатели качества прогнозов среднесуточных уровней воды  
в створе р. Тавда – г. Тавда

$\Delta t$	$R$	$S$	$\sigma_{\Delta}$	$S/\sigma_{\Delta}$	$P$
1	1,000	2,8	7,8	0,36	96%
2	1,000	6,1	15,4	0,40	95%
3	0,999	10,0	22,8	0,44	94%
4	0,998	14,0	30,1	0,47	93%
5	0,996	18,4	37,3	0,49	91%
6	0,993	22,9	44,3	0,52	90%
7	0,990	27,5	51,1	0,54	88%
8	0,987	32,4	57,9	0,56	88%
9	0,982	37,4	64,4	0,58	86%
10	0,977	42,6	70,9	0,60	85%

Приведенные в табл. 3 данные свидетельствуют о том, что для данного речного створа все краткосрочные прогнозы с заблаговременностью 1–5 суток относятся к категории хороших, а среднесрочные прогнозы с заблаговременностью 6–10 суток относятся к категории удовлетворительных.

На рис. 3 для этого створа приведены совмещенные графики хода фактических и спрогнозированных с заблаговременностью  $\Delta t = 7$  суток среднесуточных уровней воды в 2018 году.



**Рис. 3.** Фактический (синим) и спрогнозированный с заблаговременностью  $\Delta t = 10$  суток (красным) ход среднесуточных уровней воды в створе р. Тавда – г. Тавда в 2018 году.

Появившиеся на спрогнозированном гидрографе незначительные всплески обусловлены интенсивным ростом уровней воды перед датой составления прогноза.

### Анализ результатов верификации прогнозов

Для всех случаев, когда соотношение  $S/\sigma_{\Delta}$  не превышало 0,80, оправдываемость таких прогнозов  $P$  превышала 65%. Следовательно, соотношение  $S/\sigma_{\Delta}$  в достаточной степени характеризует удовлетворительность прогнозов уровней воды. В табл. 4 помещены значения показателя  $S/\sigma_{\Delta}$  прогнозов среднесуточных уровней воды для всех рассматриваемых речных створов бассейна Тобола.

Таблица 4

Значения показателя  $S/\sigma_{\Delta}$  прогнозов среднесуточных уровней воды при  
заблаговременности  $\Delta t = 1, \dots, 10$  суток

Номер	Река	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
12010	Тобол	0,63	0,68	0,69	0,70	0,70	0,70	0,71	0,73	0,74	0,76
12014	Тобол	0,62	0,66	0,68	0,70	0,72	0,73	0,75	0,76	0,77	0,78
12017	Тобол	0,49	0,58	0,65	0,72	0,76	0,80	0,82	0,84	0,85	0,86
12018	Тобол	0,47	0,54	0,60	0,65	0,69	0,72	0,75	0,77	0,78	0,79
12022	Тобол	0,42	0,44	0,46	0,49	0,51	0,53	0,55	0,57	0,58	0,60
12040	Уй	0,74	0,78	0,82	0,86	0,90	0,91	0,92	0,92	0,92	0,92
12043	Уй	0,83	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90
12059	Увелька	0,73	0,78	0,81	0,83	0,85	0,85	0,85	0,84	0,84	0,83
12061	Увелька	0,91	0,93	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86
12092	Юргамыш	0,81	0,85	0,87	0,89	0,90	0,91	0,90	0,90	0,90	0,89
12098	Емуртла	0,62	0,74	0,82	0,86	0,88	0,89	0,89	0,88	0,88	0,87
12101	Ук	0,84	0,88	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,84	0,83	0,83
12115	Исеть	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,90
12123	Исеть	0,82	0,89	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,92
12125	Исеть	0,74	0,81	0,83	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,90
12127	Исеть	0,53	0,60	0,65	0,70	0,74	0,76	0,78	0,80	0,81	0,82
12129	Исеть	0,57	0,63	0,67	0,71	0,73	0,76	0,77	0,79	0,80	0,81
12136	Решетка	0,96	0,96	0,95	0,94	0,94	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90
12155	Синара	0,80	0,85	0,91	0,93	0,94	0,93	0,92	0,92	0,91	0,90
12189	Миасс	0,92	0,95	0,96	0,96	0,95	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92
12202	Миасс	0,66	0,73	0,78	0,81	0,83	0,84	0,86	0,87	0,88	0,88
12222	Ирюм	0,74	0,87	0,91	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90	0,89	0,88
12238	Тура	0,63	0,72	0,77	0,81	0,83	0,85	0,86	0,87	0,87	0,88
12239	Тура	0,35	0,44	0,52	0,58	0,63	0,67	0,70	0,72	0,74	0,76
12240	Тура	0,30	0,37	0,44	0,50	0,54	0,58	0,61	0,64	0,66	0,67
12244	Тура	0,37	0,42	0,46	0,50	0,53	0,56	0,59	0,62	0,64	0,66
12248	Тура	0,42	0,45	0,48	0,51	0,53	0,55	0,57	0,59	0,61	0,63

Номер	Река	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
12279	Тагил	0,81	0,86	0,89	0,90	0,91	0,91	0,91	0,90	0,89	0,89
12305	Мугай	0,71	0,81	0,86	0,88	0,89	0,90	0,90	0,89	0,89	0,88
12315	Ница	0,61	0,70	0,77	0,81	0,84	0,87	0,88	0,88	0,89	0,89
12316	Ница	0,43	0,48	0,54	0,58	0,62	0,64	0,67	0,68	0,70	0,71
12320	Нейва	0,96	0,97	0,97	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92
12346	Реж	0,84	0,89	0,92	0,93	0,94	0,93	0,93	0,93	0,92	0,92
12354	Бобровка	0,91	0,94	0,95	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91	0,90
12383	Пышма	0,33	0,37	0,42	0,46	0,49	0,52	0,55	0,57	0,59	0,61
12401	Юрмыч	0,74	0,85	0,90	0,92	0,92	0,91	0,91	0,90	0,90	0,89
12402	Беляковка	0,71	0,78	0,83	0,86	0,87	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88
12407	Иска	0,75	0,81	0,83	0,84	0,85	0,85	0,86	0,87	0,87	0,87
12412	Тавда	0,48	0,49	0,50	0,52	0,54	0,57	0,59	0,62	0,64	0,66
12413	Тавда	0,36	0,40	0,44	0,47	0,49	0,52	0,54	0,56	0,58	0,60
12415	Тавда	0,42	0,44	0,47	0,50	0,53	0,55	0,57	0,59	0,61	0,62
12417	Лозьва	0,73	0,84	0,89	0,91	0,92	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90
12422	Ивдель	0,86	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,92	0,91	0,91
12430	Сосьва	0,77	0,85	0,89	0,90	0,90	0,90	0,90	0,89	0,88	0,87
12434	Сосьва	0,35	0,44	0,53	0,60	0,66	0,71	0,74	0,77	0,80	0,81
12435	Сосьва	0,37	0,43	0,49	0,55	0,60	0,64	0,68	0,70	0,72	0,74
12476	Вагран	0,90	0,94	0,95	0,95	0,96	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93
12498	Турья	0,91	0,94	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,91	0,90	0,89
12511	Сотрина	0,66	0,74	0,79	0,83	0,86	0,88	0,88	0,89	0,89	0,89
12517	Лобва	0,79	0,87	0,90	0,91	0,92	0,91	0,91	0,90	0,90	0,89
12528	Карабашка	0,84	0,89	0,91	0,92	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,92
12554	Тобол	0,55	0,60	0,64	0,67	0,70	0,73	0,74	0,75	0,76	0,77
12606	Бочанка	0,68	0,78	0,84	0,87	0,90	0,91	0,92	0,93	0,93	0,93
12611	Сосьва	0,50	0,61	0,69	0,75	0,79	0,83	0,85	0,87	0,88	0,89
12613	Караталаят	0,91	0,90	0,89	0,88	0,88	0,88	0,87	0,87	0,86	0,85
12614	Кунара	0,87	0,91	0,92	0,93	0,93	0,93	0,92	0,91	0,91	0,90
12615	Исеть	0,87	0,90	0,92	0,94	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93
12617	Н. Алабуга	0,92	0,95	0,95	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91	0,91
12620	Суерь	0,71	0,84	0,88	0,89	0,89	0,89	0,88	0,87	0,87	0,86
12631	Уй	0,67	0,72	0,75	0,77	0,79	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85
12632	Ирбит	0,72	0,81	0,87	0,91	0,92	0,92	0,92	0,91	0,90	0,90
12646	Каква	0,91	0,95	0,95	0,94	0,93	0,92	0,92	0,91	0,90	0,90
12651	Пышма	0,72	0,76	0,80	0,83	0,86	0,87	0,88	0,88	0,89	0,89
12652	Нейва	0,95	0,96	0,96	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91

В табл. 5 для всех значений заблаговременности  $\Delta t$  от 1 до 10 суток приведено число речных створов  $M$ , для которых получены удовлетворительные прогнозы среднесуточных уровней воды с показателями  $S/\sigma_{\Delta}$  0,80 и  $P > 60\%$ .

Число  $M$  речных створов с удовлетворительными прогнозами среднесуточных уровней воды различной заблаговременности  $\Delta t$

$\Delta t$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$M$	42	31	25	21	21	19	18	17	17	15

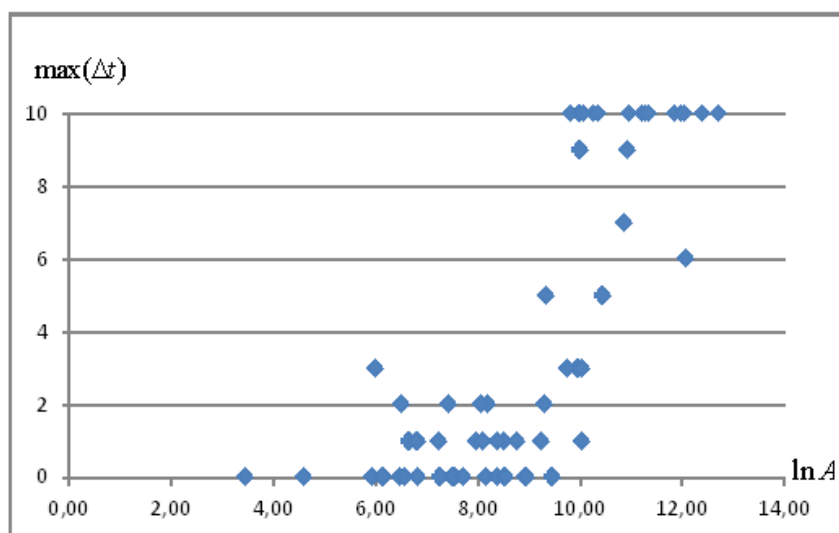
Таким образом, удовлетворительные прогнозы среднесуточных уровней воды с заблаговременностью 1 сутки получаются для 65,6 %, а с максимальной заблаговременностью 10 суток – для 23,4 % рассматриваемых речных створов бассейна Тобола.

Как и следовало ожидать, метод экстраполяции гидрографа оказался неприменимым для рек с малой площадью водосбора, сток которых быстро реагирует на таяние снега или на выпадение жидких осадков. В результате водный режим определяется серией кратковременных паводков, за пределами зимней межени ход среднесуточных уровней имеет пилообразный характер и его невозможно предсказать методом экстраполяции даже на сутки [5, 10–13].

Для рек с большой площадью водосбора ход среднесуточных уровней имеет плавный характер, как на рис. 3, поэтому метод экстраполяции гидрографа позволяет давать удовлетворительные прогнозы с достаточно большой заблаговременностью.

На рис. 4 представлена зависимость максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов  $\max(\Delta t)$  от логарифма площади водосбора  $\ln A$ . При этом величина  $\max(\Delta t)$  определяется таким образом, что прогнозы с показателями  $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$  и  $P > 60\%$  могут быть получены при всех значениях  $\Delta t$ , не превышающих величину  $\max(\Delta t)$ . Равенство  $\max(\Delta t)$  нулю означает, что для данного речного створа прогнозы уровней воды оказались неудовлетворительными даже при заблаговременности 1 сутки [4, 5].

Данная зависимость показывает, что с ростом площади водосбора максимальная заблаговременность удовлетворительных прогнозов в целом возрастает. Как правило, метод экстраполяции гидрографа не позволяет удовлетворительно прогнозировать среднесуточные уровни воды в речных створах с площадью водосбора менее 5 000 км<sup>2</sup>. Для речных створов бассейна Тобола с площадью водосбора более 50 000 км<sup>2</sup> данный метод дает удовлетворительные прогнозы с заблаговременностью не менее 5 суток.



**Рис. 4.** Зависимость максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов среднесуточных уровней воды  $\max(\Delta t)$  от логарифма площади водосбора  $\ln A$  для бассейна Тобола.

### Заключение

В отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» для рек бассейна Тобола разработана методика ежедневного прогнозирования среднесуточных уровней воды с заблаговременностью 1–10 суток в течение всего года. Методика основана на данных гидрологических наблюдений за период с 1985 по 2022 год.

В основе методики лежит метод экстраполяции гидрографа, в котором учитываются уровни воды за дату составления прогноза и за 5 предыдущих суток. Оценка параметров методики выполняется с помощью статистического анализа данных гидрологических наблюдений для каждого речного створа. В целях автоматизации процедуры получения прогнозов и оценки их качества разработана компьютерная программа на языке Python.

Проверка прогнозов, выполненная на независимом материале методом скользящего контроля, показала, что предлагаемая методика в целом дает удовлетворительные результаты прогнозирования. Удовлетворительные прогнозы с показателем  $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$  и оправдываемостью  $P > 65\%$  при заблаговременности 1 сутки получены для 42 речных створов, при заблаговременности 4 суток – для 21 створа, при заблаговременности 7 суток – для 18 створов и при заблаговременности 10 суток – для 15 речных створов. Анализ результатов верификации методики показал, что в целом качество прогнозов возрастает с увеличением площади водосбора соответствующего речного створа.

Методика может быть использована в рамках автоматизированной системы подготовки и выпуска прогнозов в целях обеспечения необходимой прогностической информацией

оперативных решений по использованию водных ресурсов рек бассейна Тобола и защите населения от опасных наводнений.

Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета 25.12.2023 принято решение внедрить предлагаемую методику краткосрочного и среднесрочного прогноза уровней воды на реках бассейна Тобола в качестве основной методики прогнозирования.

### Список литературы

1. Большой географический атлас России / Под ред. Г.В. Борисова. – М.: АСТ, 2019. – 224 с.
2. Борщ С.В., Христофоров А.В. Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. – 2015. – Специальный выпуск 355. – 198 с.
3. Борщ С.В., Колий В.М., Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Прогнозирование стока рек России методом экстраполяции гидрографа // Гидрологические исследования и прогнозы. – 2021. – № 2 (380). – С. 77–94.
4. Борщ С.В., Колий В.М., Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Возможность прогнозирования стока рек России методом экстраполяции гидрографа в зависимости от характеристик их водосборов // Гидрологические исследования и прогнозы. – 2021. – № 3 (381). – С. 115–130.
5. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Прогнозирование стока рек России. – М.: Гидрометцентр России, 2023. – 200 с.
6. Бубин М.С., Рассказова Н.С. Ритмичность многолетних колебаний стока рек как интегральный показатель изменчивости климата (на примере Урала). – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 278 с.
7. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 1. Прогнозы режима вод суши. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 193 с.
8. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 11. Средний Урал и Приуралье. Вып. 2. Тобол / Под ред. В.В. Николаенко. – Л.: Гидрометеиздат, 1965. – 240 с.
9. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 245 с.
10. Христофоров А.В., Юмина Н.М. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: АПР, 2017. – 151 с.
11. Adams T.E., Pagano T.C. Flood Forecasting: A Global Perspective. – London: Academic Press, 2016. – 480 p.
12. Greco M., Cravetta A., Della Morte R. River flow. – London: Taylor and Francis Group, 2004. – 1024 p.
13. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices // WMO-No. 168. – 2009. – 302 p.

**СИСТЕМА (ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ)  
ПРОГНОЗА ВОЛНЕНИЯ В БУХТЕ НАГАЕВА ОХОТСКОГО МОРЯ  
С ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТЬЮ ДО 5 СУТОК**

*<sup>1</sup>Дальневосточный региональный научно-исследовательский  
гидрометеорологический институт, г. Владивосток;*

*<sup>2</sup>Колымское Управление по гидрометеорологии и мониторингу  
окружающей среды, г. Магадан*

**Введение**

Зона обслуживания ФГБУ «Колымское УГМС» включает открытые и прибрежные районы Охотского моря. Оперативные испытания системы (технологической линии) прогноза волнения в прибрежных районах Охотского моря (бухта Нагаева) с заблаговременностью до 5 суток проводились с 23 июня по 5 декабря 2021 года в соответствии с Планом испытания новых и усовершенствованных технологий (методов) гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов Росгидромета на 2021 год.

Система разработана в 2020 г. в ФГБУ «ДВНИГМИ». В её основе находятся две волновых модели последнего поколения. Расчет волнения производился автоматически дважды в сутки по расписанию на срок 00 и 12 ч ВСВ. Заблаговременность прогнозов составляет 120 часов.

**1. Автоматизированная система прогноза волнения**

Система прогноза ветрового волнения в прибрежной зоне включает в себя две волновых модели, программный продукт формирования карт и несколько модулей обработки информации.

Общее время работы оперативной технологии прогноза волнения по Тихому и Индийскому океанам, дальневосточным морям и районам Восточной Арктики достигает порядка трех часов на двух вычислительных кластерах (суммарно на 28 процессорах) ФГБУ «ДВНИГМИ». В современных условиях такие затраты времени не устраивают

пользователей. Кроме того, у потребителей имеются пожелания к освещению детальной информацией и других прибрежных акваторий зоны ответственности УГМС. Имеющиеся на настоящее время вычислительные возможности ФГБУ «ДВНИГМИ», а также в большинстве случаев их отсутствие в УГМС регионов Дальнего Востока, решить такую задачу не представляют возможным. Выход из подобной ситуации при минимальных затратах на приобретение новой вычислительной техники видится в следующем: разделение технологии прогноза на отдельные цепочки с использованием аналогии «клиент» – «сервер».

Основная идея заключается в том, чтобы отдельные задачи системы прогноза передать на места в Управления гидрометеорологической службы. На основном вычислителе ФГБУ «ДВНИГМИ» («сервер») производится прием входных потоков данных полей приводного ветра и сплоченности льда, расчет по дальневосточным морям с использованием глобальной модели волнения и подготовка начальных и граничных данных для расчета волнения по отдельным прибрежным районам. Эта информация сохраняется на ftp-сервере. В УГМС устанавливается прогностический комплекс волнения («клиент») прибрежных акваторий зон ответственности Управления. После приема «клиентом» начальных данных с «сервера» производится расчет волнения и формирование выходной продукции.

На «сервере» производится подготовка входной информации. По каналам сети Интернет с сервера NCEP/NCAR (<http://nomads.ncep.noaa.gov/>) скачиваются в автоматическом режиме файлы с прогнозами приводного ветра в коде GRIB2. Поскольку на каждый временной срок объем данных большой, составлен запрос, реализованный в программном скрипте, который позволяет получать с сервера только необходимую информацию в пределах расчетной области. Выбираются поля  $u$  и  $v$  компонент скорости приводного ветра на высоте 10 м. Разрешение сеточной области этих полей –  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ . Заблаговременность прогнозов до 120 часов, дискретность – 6 часов. Используются данные от срока 00 и 12 ч ВСВ. При расчетах волнения дополнительно используются поля сплоченности.

Далее составляется прогноз волнения при помощи дискретной спектральной модели WAVEWATCH III, версия 6.07 [4]. При прогностических расчетах учитываются все известные механизмы генерации и распространения волн. Функция источников и стоков включает в себя: генерацию волн ветром, диссипацию волнения на глубокой воде, нелинейное взаимодействие в спектре ветрового волнения, диссипацию за счет трения о дно, опрокидывание волн (эффект серфинга) и взаимодействие волн со льдом.

Вывод информации производится с дискретностью 6 часов и включает в себя: высоту, период, направление и длину волны смешанного, ветрового волнения и зыби трех систем. Дополнительно записываются спектральные характеристики волн и скорость приводного ветра в расчетных узлах области.

На следующем этапе производится обработка выходных данных модели и запись в файлы текстового формата, которые обрабатываются и сохраняются для решения последующих задач как оперативного, так и климатического плана.

Построение прогностических карт производится при помощи программного продукта “The Generic Mapping Tools” [5]. На карты наносится высота смешанного волнения, направления подхода волн и положение ледяного поля.

После обработки прогностических данных автоматически производится подготовка начальных и граничных условий для прибрежных акваторий. Выбирается информация о скорости ветра, высоте, периоде и направлении волн для соответствующего прибрежного района и формируются файлы в формате, используемом в модели SWAN [3]. В том случае, когда море покрыто льдом, расчет по данному району не производится. Информация размещается на ftp-сервере ФГБУ «ДВНИГМИ».

ФГБУ «Колымское УГМС» («клиент») скачивает на свой компьютер эти данные и запускает скрипт расчета волнения для бухты Нагаева Охотского моря. Расчеты производятся по волновой модели SWAN версии 41.20, специально разработанной для прибрежных и мелководных зон. Расчетная сетка состоит из 116×34 точек с пространственным шагом 155×290 м. Дискретность вывода информации равна 6 часам.

Затем происходит обработка результатов работы модели SWAN. На выходе получаем карты по акватории и текстовый файл с прогнозами по отдельным, предварительно заданным пунктам (рис. 1). Текст содержит информацию: дата и время, наименование пункта, высота, период, направление волнения, скорость и направление ветра.

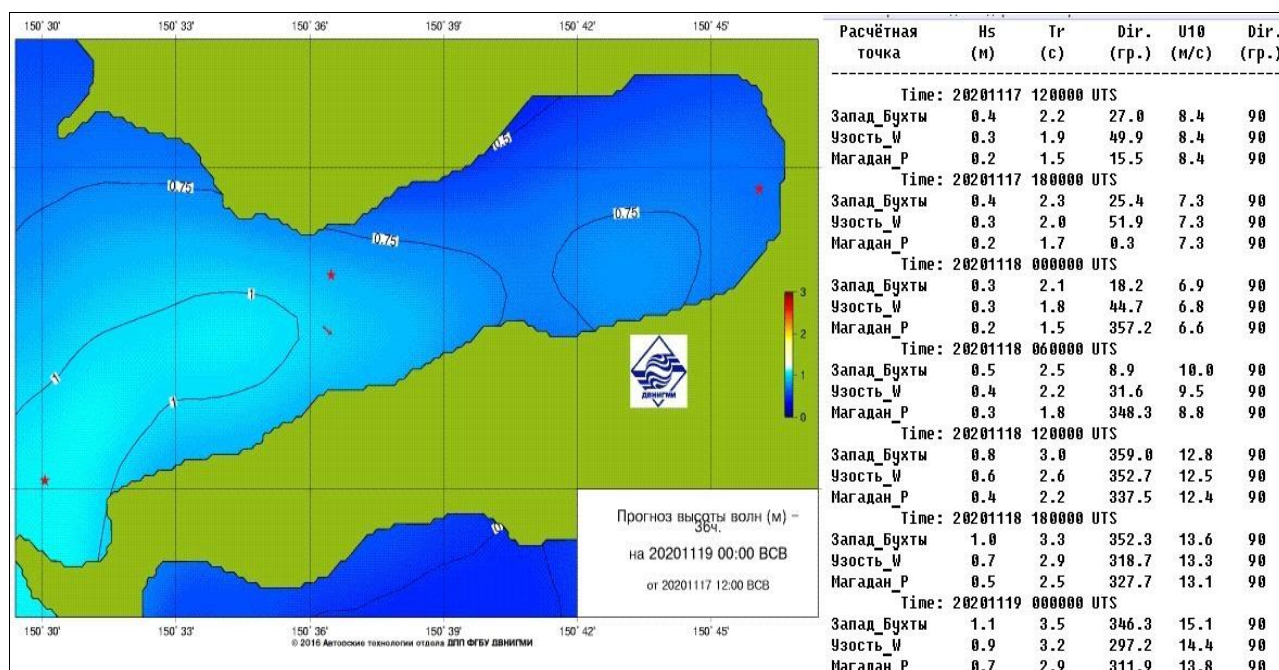


Рис. 1. Пример прогноза волнения по акватории бухты Нагаева.

## 2. Оперативные испытания системы прогноза волнения прибрежной зоны

За период оперативных испытаний составлено 318 прогнозов. По техническим причинам потеряно 13. На эти даты информация не восстанавливалась.

Качество прогнозов высоты волн проводилась согласно Наставлению [1]. Допустимой ошибкой принималась величина, не более 30 % от наблюдаемого значения. В бухтах, небольших заливах, портах и на мелководье прибрежных зон прогнозы считаются оправдавшимися при любой действительной высоте волн от 0 до 0,25 м [1, пункт 7.3.4.1.10].

Оценивалась высота волн в сравнении с данными наблюдений гидрометеорологической станции Магадан. Источник информации – телеграммы в коде КН-02 SEA.

Приняты следующие обозначения, которые будут использоваться по тексту и в таблицах: *Bias* — систематическая ошибка,  $|\bar{\Delta}|$  – средняя абсолютная ошибка, *RMSE* – средняя квадратическая ошибка,  $\sigma$  – стандартное отклонение от среднего, *r* – коэффициент корреляции, *P* – оправдываемость прогнозов (%).

### 2.1. Оценка качества прогнозов скорости приводного ветра

Прежде чем перейти к оценке высоты волн, рассмотрено качество исходной информации для прогнозов волнения, а именно, модуля скорости и направления приводного ветра на высоте 10 м полей GFS (глобальной прогностической системы). За время испытаний максимальная скорость составила по данным наблюдений 12 м/с. Прогностическая колебалась от 13 до 17 м/с в зависимости от заблаговременности. В табл. 1 и 2 приведены оценки в сравнении с наблюдениями на станции Магадан.

Критерий оправдываемости –  $\pm 0,674\sigma$ . Для модуля скорости  $\sigma$  равна 2,6 м/с, по направлению – 115°.

Таблица 1

Оценка качества прогнозов скорости ветра GFS в сравнении с наблюдениями на станции Магадан

Статистики	Заблаговременность (часы)									
	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120
<i>Bias</i> , м/с	0,87	0,82	0,76	0,74	0,89	0,75	0,78	0,63	0,45	0,34
<i>RMSE</i> , м/с	2,32	2,30	2,17	2,30	2,50	2,47	2,47	2,53	2,46	2,58
$ \bar{\Delta} $ , м/с	1,80	1,78	1,73	1,76	1,93	1,86	1,80	1,90	1,97	1,90
<i>r</i>	0,72	0,69	0,73	0,68	0,64	0,64	0,65	0,60	0,58	0,52
<i>P</i> , %	77,1	75,7	77,0	76,8	71,5	75,2	81,5	74,3	72,6	77,7

Оценка качества прогнозов направления ветра GFS в сравнении с наблюдениями  
на станции Магадан

Статистики	Заблаговременность (часы)									
	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120
<i>Bias</i> , °	-18	-15	-15	-17	-19	-12	2	-20	-14	3
<i>RMSE</i> , м/с	89	95	95	96	93	95	97	109	98	97
$ \bar{\Delta} $ , м/с	67	69	69	72	70	74	72	78	75	71
<i>r</i>	0,67	0,62	0,62	0,63	0,66	0,59	0,61	0,54	0,56	0,59
<i>P</i> , %	60,7	59,7	59,7	58,5	62,0	54,6	63,0	55,7	53,3	57,6

Как видно из таблиц, хуже всего оправдывается направление ветра, при этом абсолютная ошибка в пределах 70°, что является большой величиной. Согласно Наставлению [1], оценка по критерию *P* – неудовлетворительная. Для скорости ветра *P* в среднем равна 76 %, и начиная с третьих суток прогноза имеет удовлетворительную оценку.

## 2.2. Оценка качества прогнозов волнения

По данным телеграмм кода КН-02 SEA, наблюдения за волнением на прибрежной станции Магадан проводятся в сроки 00 и 06 ч ВСВ. Оценивалось качество прогнозов высот волн 13%-ной обеспеченности, или 1/3 значительных волн по международной классификации только за срок 00 ч, что соответствовало заблаговременностям, кратным 12 часам.

За период оперативных испытаний наблюдался максимум высот волн 0,5 м. Среднее арифметическое равно 0,22 м,  $\sigma = 0,12$  м. Повторяемость штилей составила 15,9 %, высот волн от 0,1 до 0,3 м – 79,3 %.

В табл. 3 приведены результаты оперативных испытаний. Максимальная прогностическая высота волны ( $h_{max}$ ) отличается от наблюдаемой не более чем на 10 см. Абсолютная и средняя квадратическая ошибки находятся в пределах  $\sigma$ . Значение коэффициента корреляции невелико, и минимум приходится на заблаговременность в 5 суток, но он значим с вероятностью 0,01 (1 %). По величине оправдываемости оценка прогноза отличная (> 93 % для краткосрочного и >90 % для среднесрочного).

В связи с тем, что колебания анализируемых рядов незначительное (в пределах 0,1–0,3 м), все ошибки не превышают точность измерения волн в 10 см.

Согласно [1, п. 7.3.4.1.13], направление ветровых волн не оценивается, но поскольку при прогнозе выдается и угол подхода, проведена оценка точности и направления. В табл. 4 представлены результаты по сравнению с наблюдениями.

Оценка качества прогнозов высот волн

Статистики	Заблаговременность (часы)									
	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120
$h_{\max}$ , м	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,5	0,6	0,5
$Bias$ , м	-0,03	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	-0,02	-0,01	-0,02	-0,01	-0,02
$RMSE$ , м/с	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,11	0,12	0,13
$ \Delta $ , м/с	0,10	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09
$r$	0,44	0,40	0,47	0,43	0,41	0,42	0,38	0,41	0,32	0,22
$P$ , %	92,1	93,1	95,7	95,8	94,2	95,7	95,5	94,3	93,3	92,8

Таблица 4

Оценка качества прогнозов направления подхода волн

Статистики	Заблаговременность (часы)									
	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120
$Bias$ , °	-25	-14	-31	-26	-32	-24	-23	-32	-2	-18
$RMSE$ , м/с	107	108	98	101	99	101	105	101	115	107
$ \Delta $ , м/с	88	88	84	87	84	85	88	88	96	90
$r$	0,64	0,63	0,72	0,71	0,73	0,70	0,68	0,72	0,58	0,64
$P$ , %	46,4	50,0	43,9	47,9	47,4	46,1	47,4	47,9	44,4	44,6

Оправдываемость по направлению рассчитывалась согласно критерия не превышения  $0,674\sigma$ . Исходя из всех статистик, можно сделать вывод о неудовлетворительном прогнозе направления. Причина этого – неточности в данных ветра, для чего и была выше проведена оценка полей GFS.

### 2.3. Сравнение с другими методами

Дополнительно рассчитывалась высота волны по формулам полуэмпирического метода ФГБУ «ГОИН» – АО «Союзморниипроект» [2], на основании которых построена номограмма, используемая в оперативной работе Управлений Росгидромета.

Расчет проводился по скорости ветра в точке, используя данные из файла результатов модели SWAN. Таким образом, входные данные по ветру едины, как для модели SWAN, так и при расчете по номограмме. В табл. 5 приведены оценки качества прогнозов и эффективность испытываемой технологии по сравнению с полуэмпирическим методом.

Коэффициенты корреляции табл. 3 и 5 находятся в пределах доверительных интервалов (0,05–0,06), по остальным статистикам наблюдается уменьшение ошибок для испытываемой

технологии. Эффективность, в среднем по всем заблаговременностям, равна 5,7 %, что говорит о преимуществе автоматизированной системы прогноза волнения.

Таблица 5

Оценка качества прогнозов высот волн по методу ГОИН – Союзморниипроект

Статистики	Заблаговременность (часы)									
	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120
$h_{\max}$ , м	0,7	0,7	0,6	0,7	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6
$Bias$ , м	-0,06	-0,06	-0,06	-0,06	-0,05	-0,06	-0,05	-0,07	-0,07	-0,08
$RMSE$ , м/с	0,15	0,14	0,14	0,16	0,15	0,15	0,14	0,15	0,16	0,17
$ \Delta $ , м/с	0,12	0,11	0,11	0,12	0,11	0,12	0,11	0,12	0,13	0,13
$r$	0,52	0,51	0,50	0,48	0,48	0,49	0,49	0,41	0,37	0,31
$P$ , %	87,1	88,9	87,8	88,0	89,1	87,2	89,6	91,4	88,9	87,8
$P_{мет} - P_{ГОИН}$	5,0	4,2	7,8	7,8	5,1	8,5	6,0	2,9	4,4	5,0

При сравнении с инерционным прогнозом на 24 часа (табл. 6), разработанная технология имеет меньшую среднеквадратическую ошибку и преимущество по эффективности. Коэффициент корреляции инерционного метода значим с вероятностью 10 %.

111

Таблица 6

Показатели качества инерционных прогнозов высоты волн на 24 часа

$Bias$ , м	$RMSE$ , м	$ \Delta $ , м	$r$	$P$ , %	$P_{мет} - P_{инерц}$
0,0	0,15	0,11	0,15	90,3	2,8

### Заключение

Автоматизированная система разработана с использованием аналога технологий «клиент» – «сервер», что позволяет задействовать вычислительные возможности ФГБУ «Колымское УГМС» и уменьшить время на составление прогноза.

В процессе оперативных испытаний системы прогноза волнения прибрежной зоны установлено, что технология работоспособна и ее можно тиражировать на другие акватории. Полученные оценки качества прогнозов показали преимущество по сравнению с инерционным и полуэмпирическим методами.

Точность прогноза волнения сильно зависит от качества исходной информации, в данном случае от скоростей приводного ветра. Ошибки в направлении ветра приводят к

неудовлетворительному результату прогнозирования угла подхода волн. Необходимо проведение работ по уточнению данного параметра или использованию полей ветра атмосферных моделей с меньшим пространственным шагом сеточной области.

Среднеквадратическая и абсолютная ошибки сравнимы с точностью визуального наблюдения за высотами волн. Оправдываемость прогноза превышает 92 %, что относится к категории хороших и отличных прогнозов для всех заблаговременностей.

Результаты испытаний 29 марта 2022 г. были рассмотрены Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета, которая одобрила выполненную работу и рекомендовала методику к внедрению в оперативную практику ФГБУ «Колымского УГМС».

### Список литературы

1. РД 52.27.759–2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. – М.: ТРИАДА ЛТД, 2011. – 195 с.
2. РД 52.10.865–2017. Руководство по расчету режимных характеристик морского ветрового волнения. – Обнинск: Атрифлекс, 2018. – 63 с.
3. SWAN. User manual / Delft University of Technology, Environmental Fluid Mechanics Section. – 2020. – 143 p. – URL: <http://www.swan.tudelft.nl> (дата обращения 2020-11-25)
4. *Tolman H.L.* User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 6.07 Technical Note 333 /NOAA/NWS/NCEP/MMAB, 2019. – 466 p. – URL: <https://github.com/NOAA-EMC/WW3/wiki/Tech-Docs/manual.pdf> (дата обращения 2020-11-25).
5. *Wessel P., Smith W.H.F., Scharroo R., Luis J., Wobbe F.* The Generic Mapping Tools. GMT Tutorial. URL: [http://gmt.soest.hawaii.edu/doc/5.4.4/pdf/GMT\\_Tutorial.pdf](http://gmt.soest.hawaii.edu/doc/5.4.4/pdf/GMT_Tutorial.pdf) (Дата обращения 2018-11-22).

**СИСТЕМА (ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ)  
ПРОГНОЗА ВОЛНЕНИЯ  
В ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНАХ ВОСТОЧНОЙ АРКТИКИ**

*Дальневосточный региональный научно-исследовательский  
гидрометеорологический институт, г. Владивосток*

**Введение**

Арктическим морям уделяется большое внимание как важному с экономической точки зрения региону. Прогнозы волнения востребованы при гидрометеорологическом обеспечении Северного морского пути и проведении хозяйственной деятельности в прибрежной зоне.

Восточно-Сибирское и Чукотское моря входят в зону обслуживания ФГБУ «Чукотское УГМС». Оперативные испытания системы прогноза ветрового волнения в прибрежных районах этих морей проводились с 6 июня по 6 ноября 2022 года в соответствии с Планом испытания новых и усовершенствованных технологий (методов) гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов Росгидромета на 2022 год.

Технология разработана в 2017 г. в отделе долгосрочных прогнозов погоды и изучения климата ФГБУ «ДВНИГМИ», в 2021 г. она была модифицирована. Расчеты производятся автоматически дважды в сутки по расписанию на срок 00 и 12 ч ВСВ. Заблаговременность прогнозов составляет 120 часов. Вся информация выставляется на сайте ФГБУ «ДВНИГМИ».

**1. Автоматизированная система прогноза волнения**

Технология прогноза ветрового волнения по морям Восточной Арктики (Восточно-Сибирское и Чукотское) и в прибрежной зоне включает в себя две волновых модели, программный продукт графического отображения и несколько модулей обработки информации. По сравнению с оперативной линией 2018 г. [1], были внесены следующие изменения.

– Произведена замена версий моделей. По морям используется WAVEWATCH III версии 6.07 [6], в прибрежных районах – SWAN версии 41.31 [5]. В моделях учитываются источники поступления энергии от ветра и диссипации энергии, нелинейное взаимодействие волн и влияние придонного трения.

– Построена новая расчетная сетка для модели WAVEWATCH III с тремя масштабами пространственного разрешения: в прибрежной зоне 4'×2', в открытой части морей 8'×4' и 16'×8', что соответствует шагу 4–8–16 км. Границы области: 138° в. д. – 153° з. д., 65,0167° с. ш. – 81,0167° с. ш. Общее количество расчетных узлов равно 23580.

– Для пунктов в районе прибрежных станций Амбарчик, Рау-Чуа, Айон, Валькаркай, Ванкарем и Уэлен, по результатам авторских испытаний 2021 г., построены регрессионные уравнения, уточняющие модельную высоту волны.

– Используются прогнозы скоростей приводного ветра на высоте 10 м модели ICON [4] (<https://opendata.dwd.de>) с пространственным разрешением ~15 км.

– Автоматически усваиваются ежедневные поля сплоченности льда, осредненные за пять дней, Японского агентства аэрокосмических исследований, Исследовательского центра наблюдения Земли с шагом сетки ~3'×3' ([https://www.eorc.jaxa.jp/cgi-bin/jasmes/climate/jasmes\\_climate\\_map\\_v3.cgi?lang=en](https://www.eorc.jaxa.jp/cgi-bin/jasmes/climate/jasmes_climate_map_v3.cgi?lang=en)).

Расчетные области прибрежных районов модели SWAN остались без изменений. Пространственный шаг сеточной области для всех прибрежных акваторий один и составляет 30"×30", что приблизительно составляет 400×900 м.

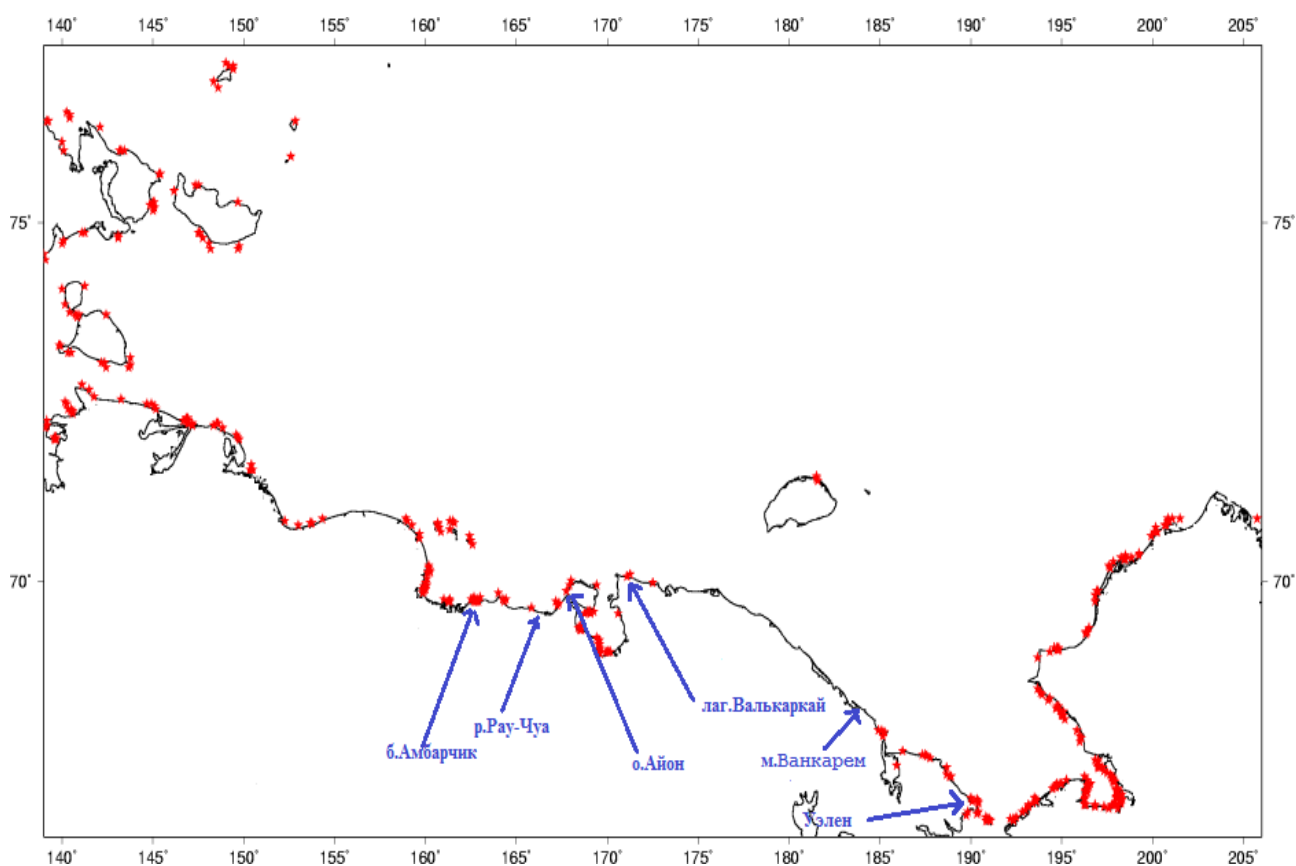
Процедура расчета волнения состоит из двух этапов. Прогноз по Восточно-Сибирскому и Чукотскому морям производится по модели WAVEWATCH. После обработки прогностических данных, а именно, подготовки начальных и граничных условий, на втором этапе с использованием SWAN рассчитывается волнение в прибрежных районах. Дискретность вывода информации двух моделей равна 3 часам.

Продукция системы прогноза (карты и текстовый файл по девяти прибрежным станциям) выставляется дважды в сутки по сети Интернет на Web-странице ФГБУ «ДВНИГМИ» (<http://www.ferhri.org/prognozy/2017-07-26-04-47-44/62-volnenie-model-ww-III-otv-isp-vrazhkin-a-n.html>).

Использование всех этих изменений технологии позволило сократить время расчетов в 1,5 раза по сравнению с предыдущей оперативной версией 2018 года.

## 2. Оперативные испытания системы прогноза волнения прибрежной зоны

Качество прогнозов высот волн оценивалось по данным, полученным со спутника Saral программы Aviso (<ftp://avisoftp.cnes.fr/AVISO/pub>). При обработке данных модели WAVEWATCH использовалась высота волн 13%-ной обеспеченности (высота значительных волн), или по международной классификации «средняя высота 1/3 наивысших волн». Рассматривались только точки в прибрежной 4-километровой полосе морей. Характеристики волн этой зоны используются как граничные условия модели SWAN при составлении прогнозов в районах расположения прибрежных станций. На рис. 1 показаны точки, для которых получены статистические оценки.



**Рис. 1.** Точки оценки высот волн по спутниковым наблюдениям (красные звездочки) и прибрежным станциям (синие стрелки).

Точность прогнозов высоты волн оценивалась согласно Наставлению [2]. В качестве допустимой ошибки прогноза принималась величина, равная 30 % от наблюдаемого значения. В морях прогнозы считаются оправдавшимися при любой действительной высоте волн от 0 до 1,0 м. В прибрежных мелководных районах, бухтах, портах – при любой действительной высоте волн от 0 до 0,2 м. Данные наблюдений на шести станциях (рис. 1) получены из телеграмм КН-02 МОРЕ на срок 00 ч ВСВ.

В табл. 1 приведены оценки качества высот волн за период проведения оперативных испытаний. Приняты следующие обозначения, которые будут использоваться по тексту и в таблицах:  $t$  – заблаговременность (часы),  $Bias$  – систематическая ошибка (м),  $|\Delta|$  – средняя абсолютная ошибка (м),  $\bar{q}$  – средняя относительная ошибка (%),  $\bar{S}$  – средняя квадратическая ошибка,  $\sigma$  – стандартное отклонение от среднего,  $r$  – коэффициент корреляции,  $SI$  – индекс рассеивания, или разброс ошибок,  $P$  – оправдываемость (%).

Таблица 1

Показатели качества прогнозов высот волн в прибрежных районах морей  
Восточной Арктики

$t$	$Bias$	$ \Delta $	$\bar{q}$	$\bar{S}$	$r$	$SI$	$S/\sigma$	$P$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Прибрежная 4-км зона								
6	-0,14	0,23	9,1	0,31	0,77	0,48	0,76	94,1
18	-0,15	0,23	9,1	0,30	0,78	0,48	0,77	94,5
30	-0,15	0,24	9,6	0,31	0,77	0,49	0,77	94,4
42	-0,15	0,23	9,2	0,30	0,79	0,47	0,74	94,8
54	-0,18	0,26	10,5	0,33	0,74	0,52	0,83	92,9
66	-0,17	0,26	10,2	0,33	0,74	0,51	0,82	93,8
78	-0,15	0,27	10,8	0,34	0,70	0,54	0,86	94,2
90	-0,17	0,26	10,6	0,35	0,68	0,55	0,88	94,6
102	-0,21	0,30	12,0	0,38	0,69	0,60	0,94	92,1
114	-0,19	0,31	12,3	0,38	0,62	0,62	0,98	90,4
Станция Амбарчик								
12	0,02	0,13	14,6	0,17	0,72	0,51	0,78	89,7
24	0,03	0,13	14,5	0,18	0,72	0,50	0,77	90,7
36	-0,04	0,13	14,5	0,17	0,71	0,50	0,77	90,7
48	-0,04	0,14	16,1	0,18	0,70	0,53	0,80	91,8
60	-0,01	0,13	14,9	0,17	0,71	0,51	0,78	89,4
72	-0,05	0,17	18,5	0,22	0,55	0,53	1,00	86,9
84	-0,03	0,18	19,6	0,23	0,47	0,66	1,02	80,0
96	-0,03	0,17	18,9	0,22	0,52	0,64	0,98	89,3
108	-0,02	0,18	20,6	0,24	0,45	0,69	1,06	84,5
120	-0,09	0,18	19,9	0,22	0,46	0,65	1,00	84,0
Станция Рау-Чуа								
12	0,00	0,04	9,8	0,08	0,64	0,57	0,78	92,2
24	0,00	0,05	9,6	0,09	0,62	0,58	0,79	92,0
36	0,00	0,04	8,8	0,08	0,64	0,56	0,81	92,0
48	0,00	0,05	9,8	0,09	0,55	0,61	0,88	89,8
60	0,01	0,04	8,6	0,08	0,60	0,57	0,90	95,9
72	0,00	0,04	7,5	0,07	0,64	0,51	0,79	97,9
84	0,00	0,04	7,0	0,07	0,55	0,55	1,00	97,9
96	0,00	0,04	8,5	0,08	0,35	0,61	1,10	97,9
108	0,00	0,04	7,9	0,08	0,43	0,59	1,08	95,8
120	0,00	0,02	5,3	0,06	0,59	0,46	0,82	97,8

Станция Айон								
12	0,00	0,10	6,8	0,13	0,86	0,58	0,51	93,2
24	0,00	0,10	6,7	0,13	0,88	0,55	0,49	93,0
36	0,00	0,10	6,8	0,14	0,85	0,60	0,53	94,8
48	0,00	0,12	6,2	0,12	0,89	0,51	0,45	91,1
60	-0,01	0,12	6,8	0,12	0,88	0,54	0,48	91,2
72	-0,02	0,10	7,0	0,13	0,88	0,54	0,49	92,7
84	-0,01	0,10	6,8	0,14	0,85	0,59	0,54	96,4
96	-0,02	0,11	7,2	0,13	0,88	0,53	0,49	92,5
108	-0,02	0,11	7,6	0,14	0,86	0,58	0,54	90,9
120	-0,04	0,12	8,1	0,15	0,85	0,60	0,55	94,1
Станция Валькаркай								
12	-0,09	0,13	10,8	0,19	0,74	0,44	0,77	90,3
24	-0,08	0,13	10,7	0,18	0,74	0,44	0,75	88,2
36	-0,08	0,13	9,8	0,19	0,73	0,44	0,75	88,4
48	-0,07	0,12	8,9	0,17	0,78	0,40	0,73	90,2
60	-0,08	0,13	9,8	0,18	0,70	0,45	0,79	88,2
72	-0,10	0,15	11,2	0,20	0,66	0,48	0,86	90,0
84	-0,10	0,14	18,0	0,20	0,49	0,50	1,03	90,0
96	-0,08	0,14	17,8	0,20	0,42	0,52	1,05	89,8
108	-0,09	0,16	20,0	0,22	0,38	0,56	1,13	86,0
120	-0,08	0,15	18,9	0,20	0,42	0,52	1,05	85,1
Станция Ванкарем								
12	-0,01	0,21	14,0	0,31	0,66	0,71	0,76	90,7
24	-0,01	0,20	13,6	0,29	0,74	0,65	0,68	85,4
36	-0,03	0,24	16,2	0,34	0,58	0,84	0,86	85,2
48	-0,03	0,24	16,2	0,36	0,58	0,85	0,86	85,2
60	-0,02	0,23	15,4	0,33	0,68	0,73	0,74	83,3
72	-0,02	0,23	15,4	0,32	0,68	0,73	0,74	83,3
84	-0,02	0,24	16,1	0,35	0,64	0,78	0,79	84,9
96	-0,02	0,24	15,9	0,32	0,71	0,70	0,73	84,3
108	-0,02	0,26	17,4	0,39	0,58	0,80	0,83	84,3
120	-0,01	0,26	17,0	0,38	0,63	0,82	0,84	85,1
Станция Уэлен								
12	-0,04	0,26	10,2	0,35	0,83	0,39	0,56	87,4
24	-0,04	0,27	10,9	0,37	0,81	0,42	0,60	84,1
36	-0,05	0,28	11,1	0,38	0,80	0,43	0,61	83,7
48	-0,04	0,31	12,4	0,43	0,73	0,49	0,70	84,9
60	-0,04	0,33	13,2	0,44	0,71	0,51	0,71	83,5
72	-0,10	0,34	13,6	0,48	0,62	0,56	0,81	83,3
84	-0,08	0,47	13,3	0,47	0,68	0,55	0,77	85,5
96	-0,07	0,33	13,3	0,47	0,67	0,55	0,77	85,5
108	-0,02	0,38	15,0	0,50	0,64	0,56	0,81	83,1
120	0,01	0,38	14,7	0,53	0,59	0,61	0,87	80,0

По величине  $P$  прогнозов модели WAVEWATCH в прибрежных районах Восточной Арктики превышает 90 %. В районе станций, по SWAN, колеблется от 97 до 80 % с заблаговременностью до 120 часов. К неудовлетворительным оценкам необходимо отнести превышение  $SI$  уровня 0,4.

С учетом количественных значений основных статистических критериев ( $S/\sigma$ ,  $r$ ,  $P$ ) можно рекомендовать использование прогнозов для станций Айон, Ванкарем и Уэлен с заблаговременностью до 120 часов; Валькаркай – 72 часа; Амбарчик – 60 часов и Рау-Чуа – 48 часов.

### 3. Сравнение с другими методами и анализ ошибок

Оценки качества инерционных прогнозов на 24 часа по прибрежным станциям приведены в табл. 2. По комплексу всех оценок преимущество этого прогноза над методическим наблюдается для станции Рау-Чуа. Для Айона – только по эффективности и абсолютной ошибке, по остальным статистикам – выигрыш методического прогноза. По станциям Валькаркай и Ванкарем, в комплексе, методический лучше, но эффективность менее 1 %. Абсолютное преимущество получено для станций Амбарчик и Уэлен.

Таблица 2

Показатели качества инерционных прогнозов высоты волн на 24 часа

Станция	$Bias$	$ \bar{\Delta} $	$\bar{q}$	$\bar{S}$	$r$	$SI$	$S/\sigma$	$P$	$P_M - P_U$
Амбарчик	0,00	0,21	20,9	0,29	0,31	0,76	1,17	74,3	16,4
Рау-Чуа	-0,07	0,04	5,6	0,09	0,80	0,53	0,61	94,4	-2,4
Айон	-0,02	0,06	3,8	0,16	0,72	0,70	0,69	98,7	-5,7
Валькаркай	-0,02	0,17	12,9	0,24	0,68	0,50	0,77	87,5	0,7
Ванкарем	-0,02	0,22	14,9	0,42	0,52	1,01	0,95	86,3	-0,9
Уэлен	-0,02	0,46	18,6	0,61	0,49	0,70	0,99	71,0	13,1

В сравнении с оперативной технологией 2018 года [1], новый модифицированный вариант системы позволяет использовать прогнозы по всем прибрежным пунктам. Ранее наблюдались неудовлетворительные прогнозы волнения в трех из четырех районов, а именно: Амбарчик, Айон и Валькаркай (по комплексу всех статистик). Лучшие прогнозы получены по оперативной версии 2018 г. для Уэлена.

Рассмотрим причины ошибок. При оценке прогнозов скорости ветра модели ICON по станциям было выявлено, что, за исключением Валькаркай и Уэлена, по модулю скорости с заблаговременностью до двух суток оценка удовлетворительная. По направлению – для всех станций оценки неудовлетворительные. Это основная причина ошибок, влияющая на качество прогнозов волнения. Сравнительный анализ скоростей приводного ветра по моделям ICON (данные за 2022 г.) и GFS (данные за 2021 г. с пространственным шагом полей  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ ) не показал однозначного преимущества одной над другой. Для станции

Уэлен причина удачных прогнозов волнения по технологии 2018 г. над новой объясняется более близкими к наблюдениям расчетной скорости ветра GFS.

Вторая причина – несоответствие координат реального расположения прибрежных станций, указанных в различных справочниках по климату, что усложняет выбор модельной точки, совпадающей пункту наблюдения. Для решения этой проблемы привлекалась компьютерная программа Google Earth. Рассматривалось спутниковое изображение местности и предположительное расположение станции (населенного пункта).

К третьей причине ошибок необходимо отнести большой шаг расчетной сетки модели SWAN (30"×30"), построенной по архиву батиметрии GEBCO. Согласно Руководства [3], при визуальном наблюдении за волнением на расстоянии до 100 м высота пункта наблюдения должна составлять 5–6 м, что не на всех станциях имеется. Перепад глубин на таком расстоянии может составлять от 1 до 10 м. При высоте волны более 0,5 м это уже существенно влияет на качество прогноза. И по этой причине сложно подобрать расчетный узел модели, который соответствует реальному пункту наблюдения.

### **Заключение**

Автоматизированная система прогноза волнения в прибрежных районах Восточной Арктики является продолжением ранее разработанной технологии (2018 г.), созданной в ФГБУ «ДВНИГМИ». По результатам оперативных испытаний получены оценки качества расчетных высот волн. Так, в 4-километровой прибрежной зоне можно использовать данные модели WAVEWATCH, около гидрометеорологических станций (порядка 200 м от берега) – модели SWAN с учетом регрессионных зависимостей.

Получено преимущество новой системы по сравнению с аналогичными прогнозами технологии 2018 г. по всем прибрежным станциям, кроме Уэлена.

Результаты испытаний 21 марта 2023 г. были рассмотрены Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета, которая одобрила выполненную работу и рекомендовала ФГБУ «ДВНИГМИ» внедрить усовершенствованную технологию и обеспечить передачу прогнозов с использованием каналов связи Интернет, а ФГБУ «Чукотское УГМС» использовать в оперативной работе продукцию системы в качестве вспомогательного метода.

### **Список литературы**

1. *Вражкин А.Н.* Автоматизированная система прогноза волнения прибрежной зоны Чукотского и Восточно-Сибирского морей. - URL: <http://method.meteorf.ru/methods/sea/shore.pptx>

2. РД 52.27.759–2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. – М.: ТРИАДА ЛТД, 2011. – 195 с.

3. РД 52.10.865–2017. Руководство по расчету режимных характеристик морского ветрового волнения. – Обнинск: Атрифлекс, 2018. – 63 с.

4. *Prill F., Reinert D., Rieger D., Zängl G.* ICON Tutorial: Working with the ICON. Deutscher Wetterdienst (DWD). – 2020. – 278p. – DOI: 10.5676/DWD pub/nwv/icon tutorial2020.

5. *SWAN.* User manual / Delft University of Technology, Environmental Fluid Mechanics Section. – 2020. – 143 p. – URL: <http://www.swan.tudelft.nl> (Дата обращения 2020-11-25)

6. *Tolman H.L.* User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 6.07 Technical Note 333 / NOAA/NWS/NCEP/MMAB, 2019. – 466 p. – URL: <https://github.com/NOAA-EMC/WW3/wiki/Tech-Docs/manual.pdf> (Дата обращения 2020-11-25).

УДК 551.509.313.001.572

**Технология среднесрочного прогноза на основе модели ПЛАВ10 с горизонтальным разрешением около 10 км** / Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Гойман Г.С., Травова С.В., Зарипов Р.Б., Алипова К.А., Рогутов В.С., Мизяк В.Г., Багров А.Н., Трубина М.А. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2024. – Информационный сборник № 51. – С. 3–11.

Представлено краткое описание глобальной модели ПЛАВ10, методика оценки результатов прогнозов. Описаны результаты оперативных испытаний модели.

*Ключевые слова:* численный прогноз погоды, глобальная модель атмосферы ПЛАВ, технология среднесрочного прогноза погоды

Табл. 5. Ил. 3. Библ. 10.

УДК 551.509.313.001.572

**Технология детализированных по времени ансамблевых долгосрочных прогнозов с еженедельной дискретностью выпуска на основе модели ПЛАВ072L96** / Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Травова С.В., Зарипов Р.Б., Мизяк В.Г., Рогутов В.С., Куликова И.А., Круглова Е.Н., Трубина М.А. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2024. – Информационный сборник № 51. – С. 12–20.

В ФГБУ «Гидрометцентр России» выполнены испытания модели долгосрочного метеорологического прогноза ПЛАВ072L96. Модель имеет горизонтальное разрешение 0,9x0,72 градуса по долготе и широте, 96 уровней по вертикали. Представлена методика испытаний и некоторые результаты.

*Ключевые слова:* численный прогноз погоды, глобальная модель атмосферы ПЛАВ, технология долгосрочного прогноза погоды

Табл. 3. Библ. 14.

**Система сезонного метеорологического прогноза на базе модели INM-CM5** / Хан В.М., Тищенко В.А., Круглова Е.Н., Субботин А.В., Реснянский Ю.Д., Володин Е.М., Грицун А.С., Воробьева В.В., Тарасевич М.А. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2024. – Информационный сборник № 51. – С. 21–36.

В ФГБУ «Гидрометцентр России» совместно с ФГБУН «ИВМ РАН» разработана система глобального ансамблевого сезонного прогноза на основе глобальной климатической модели INM-CM5 и системы подготовки начальных состояний в океане, разработанной в Гидрометцентре России. Проводились оперативные испытания системы сезонного метеорологического прогноза на базе модели INM-CM5 для периода со II квартала 2021 г. по III квартал 2023 г., а также авторские испытания вероятностных и детерминистских прогнозов на ретроспективной выборке за период с 1991 по 2020 год.

В период испытаний производилось сравнение успешности ансамблевых сезонных прогнозов по модели INM-CM5 с успешностью аналогичных ансамблевых прогнозов зарубежных метеоцентров. Результаты испытаний показали, что оценки успешности ансамблевых прогнозов рассматриваемых параметров по территории земного шара и по отдельным регионам сопоставимы с оценками успешности ансамблевых прогнозов зарубежных метеоцентров, участвующих в проекте LC-MME WMO. Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета сочла целесообразным рекомендовать к внедрению в прогностическую работу ФГБУ «Гидрометцентр России» и Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) «Систему сезонного метеорологического прогноза на базе модели INM-CM5».

*Ключевые слова:* сезонные прогнозы, модель INM-CM5, предсказуемость, неопределенность, оценки прогнозов, зарубежные метеоцентры

Табл. 11. Библ. 8.

**Метод сверхдолгосрочного прогнозирования состояния климатической системы на основе климатической модели ИВМ РАН INM-CM5 и системы подготовки данных Гидрометцентра России** / Тищенко В.А., Хан В.М., Реснянский Ю.Д., Володин Е.М., Грицун А.С., Воробьева В.В., Тарасевич М.А. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2024. – Информационный сборник № 51. – С. 37–44.

В ФГБУ «Гидрометцентр России» совместно с ФГБУН «ИВМ РАН» разработан метод сверхдолгосрочного прогнозирования климатической системы на основе климатической модели ИВМ РАН INM-CM5 и системы подготовки данных Гидрометцентра России. Испытания метода ансамблевого сверхдолгосрочного прогноза на основе модели INM-CM5 были произведены для периода с 1960 по 2022 год. Оценки успешности среднегодовых и средних за пять лет прогнозов атмосферного давления на уровне моря, геопотенциала поверхности 500 гПа, приземной температуры воздуха и количества осадков рассчитывались с учетом наставлений Всемирной метеорологической организации (ВМО). Анализ успешности ансамблевых сверхдолгосрочных прогнозов на основе модели INM-CM5 сопоставлялся с результатами аналогичных прогнозов, выпущенных ведущими международными метеорологическими центрами, участвующими в консорциуме по годовому и десятилетнему прогнозированию ВМО (LC-ADCP WMO). Результаты испытаний показали, что оценки успешности ансамблевых годовых и пятилетних вероятностных и детерминистских прогнозов основных метеоэлементов по территории земного шара и по отдельно взятым регионам сопоставимы с оценками успешности аналогичных ансамблевых прогнозов зарубежных метеоцентров, участвующих в проекте LC-ADCP WMO, что является свидетельством о соответствии разработанного метода сверхдолгосрочного метеорологического прогноза на базе модели INM-CM5 мировому уровню. Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета сочла целесообразным рекомендовать к внедрению в прогностическую работу ФГБУ «Гидрометцентр России» и Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) «Метод сверхдолгосрочного прогнозирования состояния климатической системы на основе климатической модели ИВМ РАН INM-CM5 и системы подготовки данных Гидрометцентра РФ».

*Ключевые слова:* свехдолгосрочные прогнозы, модель INM-CM5, предсказуемость, неопределенность, оценки успешности прогнозов, консорциум по годовому и десятилетнему прогнозированию ВМО

Табл. 11. Библ. 8.

УДК 631.559:633.16:551.509.32

**Результаты испытания метода долгосрочного прогноза урожайности и валового сбора ярового ячменя по федеральным округам и России в целом / Лебедева В.М., Береза О.В. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2024. – Информационный сборник № 51. – С. 45–57.**

Излагаются результаты авторских и производственных испытаний синоптико-статистического метода долгосрочного прогноза урожайности ярового ячменя по федеральным округам и России в целом в ФГБУ «Гидрометцентр России». В основе синоптико-статистического метода лежит использование длиннопериодных связей параметров циркуляции атмосферы Северного полушария в вегетационный период с параметрами циркуляции предшествующего осенне-зимнего периода. Заблаговременность прогноза составляет около шести месяцев, прогноз составляется в марте.

*Ключевые слова:* метод, долгосрочный прогноз валового сбора, яровой ячмень, циркуляция атмосферы, температура поверхности океанов, методика, результаты испытаний

Табл. 4. Ил. 6. Библ. 14.

УДК 631.559:633.12:551.509.32

**Результаты испытания автоматизированной технологии составления оценки условий вегетации и прогноза урожайности гречихи по субъектам Российской Федерации в Гидрометцентре России / Лебедева В.М., Береза О.В. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2024. – Информационный сборник № 51. – С. 58–71.**

Представлены результаты авторских и производственных испытаний в Гидрометцентре России автоматизированной технологии составления оценки условий вегетации и прогноза урожайности гречихи по субъектам РФ с заблаговременностью 1–2 месяца в рамках информационно-прогностической системы.

Информационно-прогностическая система позволяет на базе персонального компьютера осуществлять обработку декадных телеграмм, ежедекадно получать оценку условий вегетационного периода и проводить расчёты ожидаемой урожайности сельскохозяйственных культур по субъектам Российской Федерации в сроки, установленные «Планом выпуска основных агрометеорологических прогнозов и докладов».

*Ключевые слова:* автоматизированная система, динамико-статистическая модель «погода – урожай», прогноз урожайности, гречиха, оправдываемость метода, результаты испытаний

Табл. 3. Ил. 6. Библ. 14.

УДК 631.559:633.12:551.509.3

**Результаты испытания методов прогноза урожайности картофеля по Иркутской области /** Пищимко О.И., Соболева Т.Д. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2024. – Информационный сборник № 51. – С. 72–75.

Приведены результаты испытания методов прогноза урожайности картофеля по всем категориям хозяйств и сельскохозяйственным предприятиям Иркутской области, разработанных в рамках выполнения темы 1.2.4.2 Плана НИОКР Росгидромета на 2020–2024 гг. Решением Технического совета ФГБУ «Иркутское УГМС» от 20 апреля 2023 г. и ЦМКП от 29 мая 2023 г. рекомендованы к внедрению с 1 августа 2023 г. в оперативную практику специалистов-агрометеорологов Гидрометцентра ФГБУ «Иркутского УГМС» «Метод прогноза урожайности картофеля по всем категориям хозяйств Иркутской области» (модель 1) и «Метод прогноза урожайности картофеля по сельскохозяйственным предприятиям Иркутской области» (модель 1) в качестве основного расчетного метода на срок 1–3 августа.

*Ключевые слова:* прогноз урожайности картофеля, Иркутская область, результаты испытаний  
Табл. 1. Библ. 4.

УДК 556.06

**Методика краткосрочного и среднесрочного прогноза расхода и уровней воды на реках бассейна Дона /** Христофоров А.В. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2024. – Информационный сборник № 51. – С. 76–90.

Для рек бассейна Дона в ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана методика ежедневного краткосрочного и среднесрочного прогнозирования расходов и уровней воды. Среднесуточные расходы и уровни воды прогнозируются в течение всего года с заблаговременностью от 1 до 10 суток на основе метода экстраполяции гидрографа, в котором учитываются их значения за дату составления прогноза и за 5 предыдущих суток. Для оценки параметров схемы получения прогноза используются данные гидрологических наблюдений для каждого речного створа.

Методика дает удовлетворительные результаты и может быть использована в рамках автоматизированной системы подготовки и выпуска прогнозов в целях обеспечения необходимой прогностической информацией оперативных решений по использованию водных ресурсов рек бассейна Дона и защите населения от опасных наводнений.

*Ключевые слова:* расходы воды, уровни воды, прогноз, заблаговременность; верификация, погрешность; оправдываемость прогнозов

Табл. 5. Ил. 3. Библ. 14.

УДК 556.06

**Методика краткосрочного и среднесрочного прогноза уровней воды на реках бассейна Тобола** / Христофоров А.В. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2024. – Информационный сборник № 51. – С. 91–104.

Для рек бассейна Тобола в ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана методика ежедневного краткосрочного и среднесрочного прогнозирования уровней воды. Среднесуточные уровни воды прогнозируются в течение всего года с заблаговременностью от 1 до 10 суток на основе метода экстраполяции гидрографа, в котором учитываются уровни воды за дату составления прогноза и за 5 предыдущих суток. Для оценки параметров схемы получения прогноза используются данные гидрологических наблюдений для каждого речного створа.

Методика дает удовлетворительные результаты и может быть использована в рамках автоматизированной системы подготовки и выпуска прогнозов в целях обеспечения необходимой прогностической информацией оперативных решений по использованию водных ресурсов рек бассейна Тобола и защите населения от опасных наводнений.

*Ключевые слова:* уровни воды, прогноз, заблаговременность; верификация, погрешность; оправдываемость прогнозов

Табл. 5. Ил. 4. Библ. 13.

УДК 551.466.33

**Система (технологическая линия) прогноза волнения в бухте Нагаева Охотского моря с заблаговременностью до 5 суток** / Вражкин А.Н., Таин В.Н. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2024. – Информационный сборник № 51. – С. 105–112.

Приведено описание технологии прогноза волнения в прибрежной зоне Охотского моря. Используются две модели последнего поколения. Оперативные испытания системы прогноза проводились с июня по декабрь 2021 года. Заблаговременность прогноза составляет 120 часов. Рассмотрены оценки качества прогнозов скорости приводного ветра и высоты волн в сравнении с данными наблюдений на гидрометеорологической станции Магадан.

*Ключевые слова:* волновая модель, бухта Нагаева, показатели успешности прогноза

Табл. 6. Ил. 1. Библ. 5.

УДК 551.466.33

**Система (технологическая линия) прогноза волнения в прибрежных районах Восточной Арктики** / Вражкин А.Н. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2024. – Информационный сборник № 51. – С. 113–120.

Приведено описание изменений ранее разработанной технологии прогноза волнения прибрежной зоны Восточной Арктики. Используются две модели последнего поколения. Оперативные испытания проводились с июня по ноябрь 2022 г. Заблаговременность прогноза составляет 120 часов. Получены оценки качества расчетных высот волн в сравнении с данными наблюдений и инерционными прогнозами. Проведен анализ ошибок.

*Ключевые слова:* высота волнения, прибрежные акватории, показатели успешности прогноза

Табл. 2. Ил. 1. Библ. 6.

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Гойман Г.С., Травова С.В., Зарипов Р.Б., Алипова К.А., Рогутов В.С., Мизяк В.Г., Багров А.Н., Трубина М.А.</i> Технология среднесрочного прогноза на основе модели ПЛАВ10 с горизонтальным разрешением около 10 км .....	3
<i>Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Травова С.В., Зарипов Р.Б., Мизяк В.Г., Рогутов В.С., Куликова И.А., Круглова Е.Н., Трубина М.А.</i> Технология детализированных по времени ансамблевых долгосрочных прогнозов с еженедельной дискретностью выпуска на основе модели ПЛАВ072L96 .....	12
<i>Хан В.М., Тищенко В.А., Круглова Е.Н., Субботин А.В., Реснянский Ю.Д., Володин Е.М., Грицун А.С., Воробьева В.В., Тарасевич М.А.</i> Система сезонного метеорологического прогноза на базе модели INM-CM5 .....	21
<i>Тищенко В.А., Хан В.М., Реснянский Ю.Д., Володин Е.М., Грицун А.С., Воробьева В.В., Тарасевич М.А.</i> Метод сверхдолгосрочного прогнозирования состояния климатической системы на основе климатической модели ИВМ РАН INM-CM5 и системы подготовки данных Гидрометцентра России .....	37
<i>Лебедева В.М., Береза О.В.</i> Результаты испытания метода долгосрочного прогноза урожайности и валового сбора ярового ячменя по федеральным округам и России в целом .....	45
<i>Лебедева В.М., Береза О.В.</i> Результаты испытания автоматизированной технологии составления оценки условий вегетации и прогноза урожайности гречихи по субъектам Российской Федерации в Гидрометцентре России .....	58
<i>Пищимко О.И., Соболева Т.Д.</i> Результаты испытания методов прогноза урожайности картофеля по Иркутской области .....	72
<i>Христофоров А.В.</i> Методика краткосрочного и среднесрочного прогноза расхода и уровней воды на реках бассейна Дона .....	76
<i>Христофоров А.В.</i> Методика долгосрочного прогноза типов температуры воздуха для западного района Арктики на осенне-зимний период (октябрь-февраль) на основе макроциркуляционного метода .....	92
<i>Вражкин А.Н., Таин В.Н.</i> Система (технологическая линия) прогноза волнения в бухте Нагаева Охотского моря с заблаговременностью до 5 суток .....	105
<i>Вражкин А.Н.</i> Система (технологическая линия) прогноза волнения в прибрежных районах Восточной Арктики .....	113