

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ  
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ»

## **ИНФОРМАЦИОННЫЙ СБОРНИК**

**№ 44**

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

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

2017

Информационный сборник № 44. Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов / под ред. канд. геогр. наук А.А. Алексеевой. — М.; Обнинск: ИГ—СОЦИН, 2017. — 184 с.

**ISBN 978-5-9908623-4-0**

Рассматриваются методика и технология мониторинга изменений климата земного шара (подсистема: приземная температура), а также технология экспресс-мониторинга климатических аномалий температуры воздуха по Северному полушарию на основе SYNOP и CLIMAT. Излагаются особенности модели COSMO-Ru с разрешением 2,2 км, представлены результаты ее испытания по двум территориям: Центральному федеральному округу и Северному Кавказу. Приводится краткое описание метода и технологии прогноза опасного природного явления — аномально жаркой погоды в летний период. Рассмотрена методика определения высоты слоя свежевывапавшего снега по данным автоматических осадкомеров OTT Pluvio<sup>2</sup> 200 и метеостанций на территории Санкт-Петербурга и ближайших пригородов. Приведены результаты испытания методов прогноза урожайности однолетних и многолетних трав по Новосибирской, Кемеровской областям и Алтайскому краю. Три статьи посвящены испытаниям методов морской тематики: среднесрочного численного прогноза ледовых условий для летнего и зимнего периодов в Баренцевом и Карском морях с заблаговременностью 1–7 суток; прогноза типа ледовых условий в юго-западном и северо-восточном районах Карского моря в период с октября по май месяцы с нулевой заблаговременностью на 30 суток; прогноза ветрового волнения в Черном море с детализацией в шельфовых зонах. В двух статьях излагаются гидрологические методы: для реки Амур — система методик краткосрочного прогнозирования уровней воды и методы долгосрочного прогноза максимальных уровней воды для р. Обь у г. Нижневартовска. Представлены результаты испытания методики дешифрирования облачного покрова по спутниковым данным.

Приведены рекомендации ЦМКП Росгидромета о внедрении всех представленных методов.

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

**УДК 551.5**

**ISBN 978-5-9908623-4-0**

© Коллектив авторов, 2017  
© ФГБУ «Гидрометцентр России», 2017

*Г.В. Груза, Э.Я. Ранькова, Э.В. Рочева*

## **МЕТОДИКА «МОНИТОРИНГ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА ЗЕМНОГО ШАРА: ПРИЗЕМНАЯ ТЕМПЕРАТУРА» И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕЕ ИСПЫТАНИЯ**

Регулярный мониторинг климата является актуальной задачей Росгидромета. Методика «Мониторинг изменений климата земного шара: Приземная температура» (GCCM – Global Climate Change Monitoring) и реализующая ее технология разработаны в 2014–2016 гг. в ФГБУ «Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН» в рамках НИР 1.3.1.2 «Мониторинг изменений и изменчивости глобального климата (температура воздуха) по данным наблюдений и реанализа». Задача мониторинга в этой НИР ограничена единственной составляющей – приземной температурой, т. е. температурой приземного воздуха над сушей и поверхностного слоя воды в океанах и морях, но в глобальном рассмотрении.

Созданная технология GCCM является развитием действующей в ИГКЭ технологии мониторинга климата на территории Российской Федерации, разработанной ранее с участием авторов [1]. До 2012 года в Росгидромете не было утвержденной методики мониторинга климата. Основные методические решения, найденные исполнителями при создании первой системы и утвержденные ЦМКП Росгидромета [4], использованы в методике GCCM без принципиальных изменений.

Напомним, что упомянутая методика была основана на собственной базе исторических данных о среднемесячных величинах климатических характеристик на станциях сети гидрометеорологических наблюдений (1383 станции), ежемесячно пополняемой данными телеграмм КЛИМАТ. Методика включает:

— временные ряды месячных данных о температуре воздуха на станциях сети гидрометеорологических наблюдений (1383 станции земного шара, из которых 455 — станции стран СНГ и Балтии), доступные не позднее, чем с 1951 г. (наиболее длинные ряды — с 1886 г.);

— средства пополнения базы текущими данными КЛИМАТ, получаемыми из ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» и ФГБУ «Гидрометцентр России» (выборка, многоступенчатый контроль, включая логический, статистический, горизонтальный и визуальный, приведение к необходимым форматам и запись в базу);

— средства расчета климатических аномалий, индексов и статистик, включая сезонное (годовое) и региональное осреднение аномалий, расчет эмпирических вероятностей, региональных индексов аномальности и экстремальности, локальных и региональных трендов.

Методика мониторинга климата на территории Российской Федерации (температура приземного воздуха) используется для подготовки разделов о температуре воздуха в ежегодном докладе Росгидромета об особенностях климата на территории Российской Федерации, для выпуска сезонных и годовых бюллетеней «Изменения климата. Обзор состояния и тенденций изменения климата России», а также бюллетеней СЕАКЦ (Северо-Евразийский климатический центр, <http://seakc.meteoinfo.ru/>) «Обзор состояния и тенденций изменения климата на территории стран СНГ» и других материалов. Возможно привлечение данных наблюдений, поступающих в коде SYNOP, для экспресс-анализа предварительных оценок климатических статистик.

Таким образом, позаимствованными основными методическими решениями в рассматриваемой методике являются методика контроля и усвоения данных станционных наблюдений, процедуры пространственно-временного осреднения, вероятностные показатели аномальности и экстремальности климата, процедуры оценивания многолетних трендов и другие. Поэтому при разработке новой системы основное внимание было уделено созданию информационной базы, разработке новых форм выходной продукции и новой технологии, а методика была адаптирована к задачам глобального рассмотрения.

Средствами технологии GCCM выполняется полный цикл обработки, от усвоения оперативных данных и расчета материалов мониторинга

до подготовки выходной продукции. Все расчеты выполняются в пакетном режиме.

Технология GCCM включает:

– специализированную БД GCCM, содержащую данные ИГКЭ на суше земного шара (массив станционных данных T3288) и данные Великобритании (далее Hadley/CRU) на всей территории земного шара, суша+море (сеточные данные HadCRUT4 и глобальные временные ряды HadCRUT4, CRUTEM4, HadSST3). Сопровождение и пополнение массива T3288 осуществляется в ИГКЭ (в рамках рассматриваемой технологии). Данные Великобритании обновляются и публикуются изготовителем (UK, MetOffice/CRU) и ежемесячно скачиваются в БД GCCM с сайта <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/>;

– Блок-1 «Усвоение оперативных данных», содержащий:

а) средства пополнения массива T3288 текущими данными КЛИМАТ и СИНОП, получаемыми из ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» и ФГБУ «Гидрометцентр России» (ввод, отбор данных в соответствии с критериями, многоступенчатый контроль, приведение к необходимым форматам и запись в базу);

б) средства обработки данных Hadley/CRU, уже пополненных производителем (считывание с интернет-портала Hadley-CRU, распаковка, упорядочение, приведение к необходимым форматам и запись в базу).

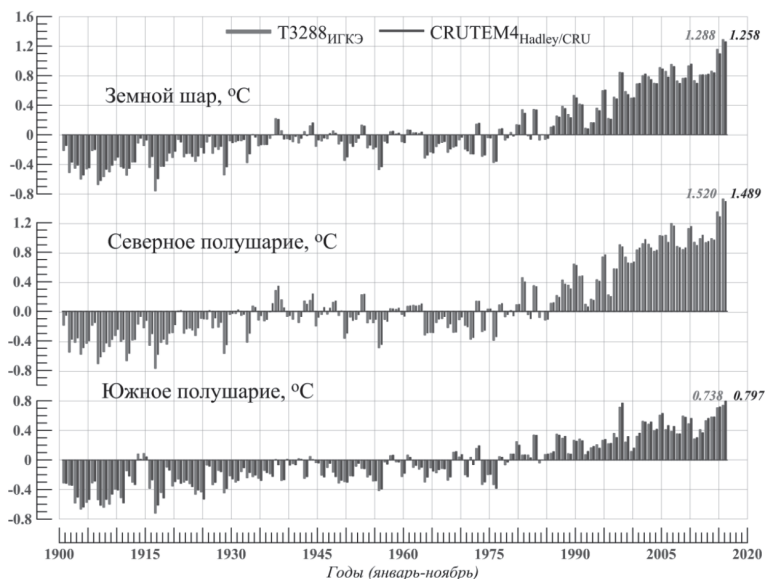
– Блок-2 «Расчет характеристик объектов мониторинга», выполняющий расчет локальных климатических аномалий, их временное и пространственное осреднение, расчет эмпирических вероятностей, показателей аномальности и оценок трендов для всех категорий данных: сеточные данные HadCRUT4 (данные Hadley/CRU, поля), станционные данные T3288 (данные ИГКЭ, поля), глобальные временные ряды (данные Hadley/CRU и расчетные данные ИГКЭ);

– Блок-3 «Подготовка выходных материалов мониторинга», обобщающий аналитические материалы мониторинга в форме числовых таблиц и графиков для введенных регионов (земной шар, полушария, континенты, океаны, широтные пояса), диаграмм (двумерные изоплеты широтных и меридиональных разрезов) и карт (локальные аномалии и оценки трендов в форме пространственных распределений).

Основные результаты относятся к температурному режиму на суше земного шара по данным ИГКЭ (массив T3288). Параллельно приводятся оценки по данным Hadley/CRU на полной сетке (массив HadCRUT4, суша+море). На наш взгляд, стационарные данные ИГКЭ более точно описывают ситуацию над континентами (особенно локализацию экстремальных аномалий), а объединенные поля HadCRUT4 дают более полную и цельную глобальную картину над Земным шаром в целом, над континентами и океанами.

Вероятностные показатели аномальности текущего состояния и оценки трендов рассматриваются в бюллетенях в трех пространственных масштабах: глобальном (земной шар и полушария), региональном (материки, океаны, широтные пояса) и локальном (в точках расположения станций и в центрах боксов). Аномалии, как правило, сопровождаются соответствующими значениями эмпирической функции распределения (вероятности непревышения и/или ранги), а оценки трендов — уровнем их статистической значимости. На картах выделяются ареалы осуществления 5 %-ных экстремумов (холодных и теплых) и рекордные климатические аномалии (абсолютные экстремумы). Временные ряды рассматриваются за весь доступный период наблюдений и дополняются линейным трендом за период с 1976 г. (условно принят за период современного глобального потепления). Пороговые значения экстремумов и базовые периоды для расчета аномалий и оценок тренда назначаются входными параметрами и могут быть изменены на уровне пакетных заданий. Например, переход к новому базовому периоду по рекомендации ВМО потребует лишь изменения двух параметров в одном пакетном задании.

В заключение отметим, что глобальные оценки *для суши* земного шара (ЗШ) и полушарий (СП, ЮП) *всегда* приводятся в бюллетене по обоим методикам — ИГКЭ (T3288) и Hadley/CRU (CRUTEM4). Их сопоставление должно дать представление о масштабе неопределенности конечных оценок и, в определенной мере, о репрезентативности используемых наборов данных. Визуально (рис.) расхождение между временными рядами ИГКЭ и Hadley/CRU в сравнении с размахом самих значений пренебрежимо мало — на рисунке показаны ряды в годовом осреднении.



**Рис. Сравнение временных рядов пространственно осредненных среднемесячных аномалий температуры приземного воздуха (1901–2016 гг.) для суши земного шара и обоих полушарий, по данным T3288 и CRUTEM4. Аномалии предварительно осреднены за первые 11 месяцев каждого года.**

В табл. 1 приведены числовые оценки таких расхождений для нескольких календарных периодов (год, зима, первое полугодие) и разных участков периода наблюдений. Сравнение здесь выполнено между ежегодными значениями «сезонных» аномалий, рассчитанных по данным двух массивов: T3288 (ИГКЭ) и CRUTEM.4.5.0.0 (Hadley/CRU) и осредненных по территории земного шара, Северного и Южного полушарий. Под «сезоном» понимается указанный в таблице календарный период года. Абсолютные величины ежегодных разностей этих аномалий затем осреднены за указанный период лет. В нижней строке приведено стандартное отклонение (std), рассчитанное на всем периоде 1901–2016 гг. для аномалий земного шара и полушарий, осредненных за первое полугодие каждого года с января по июнь (в среднем для двух рядов ИГКЭ и Hadley/CRU).

Таблица 1

**Среднее абсолютное различие глобальных временных рядов «сезонных» аномалий температуры по данным T3288 (ИГКЭ) и CRUTEM.4.5.0.0 (Hadley/CRU) за разные периоды времени**

| Период (годы)  | Сезон (календарный период) | Земной шар, °C | Северное полушарие, °C | Южное полушарие, °C |
|----------------|----------------------------|----------------|------------------------|---------------------|
| 1901–2014      | Год (I–XII)                | 0,023          | 0,021                  | 0,028               |
| 1901–1950      | Зима (XII–II)              | 0,075          | 0,075                  | 0,055               |
| 1951–2016      |                            | 0,026          | 0,024                  | 0,025               |
| 1901–2016      | Первое полугодие (I–VI)    | 0,037          | 0,035                  | 0,032               |
| 1901–1950      |                            | 0,061          | 0,059                  | 0,042               |
| 1951–2016      |                            | 0,019          | 0,018                  | 0,025               |
| 1971–2016      |                            | 0,018          | 0,017                  | 0,027               |
| Std, 1901–2016 | I–VI                       | 0,47           | 0,55                   | 0,34                |

Можно видеть, что различие между глобальными рядами в данных ИГКЭ и Hadley/CRU действительно незначительно (сравнить с std), при том что в последние 50–60 лет оно еще и заметно снизилось (качество данных наблюдений улучшилось в обоих массивах). Как результат, полученные по этим данным в технологии GCCM оценки современного потепления можно считать репрезентативными. Этот вывод соответствует также результатам прямого сравнения одноименных оценок трендов в каждом бюллетене.

В течение 2016 года, в соответствии с календарным планом НИР 1.3.1.2, исполнителями были проведены оперативные испытания технологии GCCM в производственных условиях. По оперативным данным в оперативные сроки были подготовлены экспериментальные бюллетени: годовой обзор за 2015 г. и сезонные бюллетени за 2016 г. (зима–весна–лето). Ретроспективно, по доработанной технологии, были обновлены и все сезонные бюллетени за 2015 г. Все бюллетени 2016 г. в реальном времени (в соответствии с регламентом – с запаздыванием до 1,5 месяцев) размещались на интернет-портале ИГКЭ «Мониторинг изменений глобального климата» и доступны по этому адресу в настоящее время [3].

Полученные в процессе испытаний оценки наблюдаемых в 2016 г. аномалий глобальной температуры и соответствующие оценки текущих тенденций в изменении климата (коэффициенты линейного тренда за 1976–2016 гг. приведены в табл. 2, 3. Для сравнения представлены ежемесячные текущие оценки аномалий глобальной температуры и обновленные оценки трендов за все истекшие месяцы 2016 г. по стационарным данным T3288 (ИГКЭ) и сеточным данным CRUTEM4 (Hadley/CRU).

Обе таблицы дополнены столбцом разностей  $\Delta = T3288 - CRUTEM4$ , характеризующим согласованность оценок по данным ИГКЭ и всемирно признанным данным Великобритании. Можно видеть, что различия в оценках аномалий, как правило, менее  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  (лишь в феврале и декабре для СП они составили  $0,11$  и  $0,14\text{ }^{\circ}\text{C}$  соответственно), а в оценках трендов (кроме мая и июля в Южном полушарии) — не более  $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}/10$  лет.

Таблица 2

Оценки аномалий температуры приземного воздуха в 2016 г., в среднем для земного шара (ЗШ), Северного (СП) и Южного (ЮП) полушарий по данным ИГКЭ и Hadley/CRU и различия между ними (из результатов оперативных испытаний технологии GCCM в 2016 г.)

| Месяц    | T3288 (ИГКЭ) |              |              | CRUTEM4 (Hadley/CRU) |              |              | $\Delta = T3288 - CRUTEM4$ |       |       |
|----------|--------------|--------------|--------------|----------------------|--------------|--------------|----------------------------|-------|-------|
|          | ЗШ           | СП           | ЮП           | ЗШ                   | СП           | ЮП           | ЗШ                         | СП    | ЮП    |
| Январь   | 1,360        | 1,597        | <b>0,809</b> | 1,363                | 1,596        | <b>0,896</b> | −0,00                      | 0,00  | −0,09 |
| Февраль  | 2,122        | 2,614        | 1,038        | 2,027                | 2,507        | <b>1,068</b> | 0,09                       | 0,11  | −0,03 |
| Март     | <b>1,951</b> | <b>2,366</b> | <b>1,034</b> | <b>1,892</b>         | <b>2,325</b> | <b>1,024</b> | 0,06                       | 0,04  | 0,01  |
| Апрель   | 1,616        | 1,914        | 0,914        | 1,553                | 1,875        | <b>0,910</b> | 0,06                       | 0,04  | 0,00  |
| Май      | <b>1,058</b> | 1,199        | 0,736        | <b>1,057</b>         | 1,205        | 0,762        | 0,00                       | −0,01 | −0,03 |
| Июнь     | 1,122        | <b>1,358</b> | 0,542        | 1,070                | 1,305        | 0,599        | 0,05                       | 0,05  | −0,06 |
| Июль     | <b>1,042</b> | <b>1,188</b> | 0,707        | <b>1,009</b>         | 1,141        | 0,745        | 0,03                       | 0,05  | −0,04 |
| Август   | <b>1,209</b> | <b>1,371</b> | 0,836        | <b>1,171</b>         | <b>1,326</b> | 0,862        | 0,04                       | 0,04  | −0,03 |
| Сентябрь | <b>1,198</b> | <b>1,442</b> | 0,607        | <b>1,123</b>         | 1,371        | 0,626        | 0,07                       | 0,07  | −0,02 |
| Октябрь  | 0,834        | 0,939        | 0,587        | 0,801                | 0,904        | 0,594        | 0,03                       | 0,03  | −0,01 |
| Ноябрь   | 0,811        | 0,872        | 0,668        | 0,780                | 0,826        | 0,689        | 0,03                       | 0,05  | −0,02 |

Таблица 3

**Коэффициенты линейных трендов приземной температуры (1976–2016 гг.), в среднем для земного шара (ЗШ), Северного (СП) и Южного (ЮП) полушарий по данным ИГКЭ и Hadley/CRU (из результатов оперативных испытаний технологии GCSM в 2016 г.)**

| Месяц    | T3288 (ИГКЭ) |       |       | CRUTEM4 (Hadley/CRU) |       |       | $\Delta = T3288 - CRUTEM4$ |        |        |
|----------|--------------|-------|-------|----------------------|-------|-------|----------------------------|--------|--------|
|          | ЗШ           | СП    | ЮП    | ЗШ                   | СП    | ЮП    | ЗШ                         | СП     | ЮП     |
| Январь   | 0,271        | 0,316 | 0,163 | 0,270                | 0,321 | 0,167 | 0,001                      | –0,005 | –0,004 |
| Февраль  | 0,285        | 0,348 | 0,139 | 0,279                | 0,349 | 0,139 | 0,006                      | –0,001 | 0,000  |
| Март     | 0,332        | 0,417 | 0,136 | 0,324                | 0,418 | 0,136 | 0,008                      | –0,001 | 0,000  |
| Апрель   | 0,301        | 0,376 | 0,127 | 0,293                | 0,371 | 0,136 | 0,008                      | 0,005  | –0,009 |
| Май      | 0,256        | 0,323 | 0,102 | 0,252                | 0,320 | 0,116 | 0,004                      | 0,003  | –0,014 |
| Июнь     | 0,284        | 0,329 | 0,178 | 0,277                | 0,324 | 0,182 | 0,007                      | 0,005  | –0,004 |
| Июль     | 0,259        | 0,309 | 0,146 | 0,259                | 0,308 | 0,159 | 0,000                      | 0,001  | –0,013 |
| Август   | 0,277        | 0,326 | 0,165 | 0,275                | 0,326 | 0,172 | 0,002                      | 0,000  | –0,007 |
| Сентябрь | 0,290        | 0,318 | 0,219 | 0,283                | 0,316 | 0,217 | 0,007                      | 0,002  | 0,002  |
| Октябрь  | 0,327        | 0,376 | 0,215 | 0,318                | 0,369 | 0,216 | 0,009                      | 0,007  | –0,001 |
| Ноябрь   | 0,308        | 0,367 | 0,169 | 0,299                | 0,362 | 0,173 | 0,009                      | 0,005  | –0,004 |

Еще более тесное соответствие результатов в табл. 2 прослеживается по порядковым статистикам. Жирным шрифтом выделены значения аномалий, оказавшиеся рекордно высокими в соответствующих временных рядах (2016 г. в эти месяцы был самым теплым за период наблюдений). «Рекорды» 2016 г. по данным ИГКЭ и Hadley/CRU совпадают для всех сроков и территорий, кроме июня-июля в Северном полушарии: по данным ИГКЭ – это рекорды, а по британским данным – второй и третий из самых теплых лет.

Таким образом, опытное использование технологии подтвердило ее дееспособность. Результаты практического мониторинга за этот период показали, что оценки аномалий и оценки современных тенденций в изменении глобальной температуры на суше земного шара и полушарий, полученные в технологии GCSM, хорошо согласуются с апробированными оценками Hadley/CRU и публикуемыми оценками ВМО и ведущих мировых метеорологических центров [5]. Кроме

того, результаты мониторинга глобального температурного режима у поверхности земного шара регулярно публикуются в форме аналитических обзоров в научном журнале «Фундаментальная и прикладная климатология» [6].

ЦМКП 20.12.2016 г. рекомендовала:

— внедрить «Технологию мониторинга климата земного шара: приземная температура» в качестве «основной» для регулярного осуществления мониторинга в ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН»;

— продолжить работу по развитию технологии мониторинга изменений глобального климата, включая использование дополнительных источников данных для уменьшения неопределенности оценок.

### Список литературы

1. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Мониторинг и вероятностный прогноз короткопериодных колебаний климата // 60 лет центру гидрометеорологических прогнозов. — Л.: Гидрометеоиздат, 1989. — С. 148—170.

2. Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Рочева Э.В., Самохина О.Ф. Особенности температурного режима у поверхности земли в январе-июне 2016 года // Фундаментальная и прикладная климатология. — 2016. — Том 2. — С. 119—142.

3. Мониторинг изменений климата земного шара. — <http://climatechange.su>.

4. Решение Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам от 13 декабря 2012 г. 1. Методика мониторинга климата на территории Российской Федерации: температура приземного воздуха, атмосферные осадки (ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН», коллектив авторов под руководством Г.В. Груза). — М.: Росгидромет, 2012.

5. *Provisional WMO Statement on the Status of the Global Climate in 2016* // WMO Press Release № 15. — 14 November 2016.

**Б.А. Бирман, А.Н. Багров, Ю.А. Краюшкин, Е.В. Балашова**

## **ТЕХНОЛОГИЯ ЭКСПРЕСС-МОНИТОРИНГА КЛИМАТИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕЕ ИСПЫТАНИЙ**

В ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана технология экспресс-мониторинга климатических аномалий температуры воздуха на территории Северного полушария Земли.

*Основной целью* технологии экспресс-мониторинга является *оперативное обеспечение* потребителей информацией о произошедших климатических изменениях температуры воздуха экстремального характера. Такая информация должна быть получена и при необходимости представлена в органы государственной власти в течение 2–5 дней после завершения соответствующего временного периода: месяц, сезон, год.

Еще одной целью является оперативное представление результатов мониторинга на сайте Гидрометцентра России, а также в других электронных и печатных средствах информации.

Технология экспресс-мониторинга перманентно развивается на основе меняющихся методов обработки и анализа информации.

Для экспресс-мониторинга климатических аномалий температуры воздуха используются *историческая и оперативная базы данных*.

В качестве главной исторической базы использованы среднемесячные значения температуры воздуха в узлах регулярной сетки  $5^{\circ} \times 10^{\circ}$  за 1891–1995 гг. На момент начала работ по созданию технологии экспресс-мониторинга такая информация содержалась в базе «ROWS» банка данных «Прогноз» Гидрометцентра России. Она была создана под руководством Г.В. Груза в конце 80-х — начале 90-х годов прошлого столетия и представляла собой результаты оцифровки карт среднемесячной температуры воздуха по Северному полушарию, созданных

ранее в Гидрометцентре СССР и его предшественниках. В 2014–2015 гг. все названные выше поля температуры воздуха, а их оказалось 1260 (105 лет  $\times$  12 мес.), были проконтролированы и при необходимости исправлены. Контроль осуществлялся в два этапа. На первом этапе все поля были заново переинтерполированы в узлы сетки  $5^\circ \times 5^\circ$  из узлов сетки  $5^\circ \times 10^\circ$  методом оптимальной статистической интерполяции с последовательными коррекциями, одновременно были восполнены пропущенные данные в узлах. На втором — все 1260 полей были картированы и визуально проконтролированы специалистом.

Другой источник исторической базы данных — это нормы температуры воздуха по станциям за 1961–1990 гг., опубликованные в издании ВМО [1]. Климатические нормы по территории Российской Федерации и стран СНГ были предоставлены ВНИИГМИ-МЦД. Некоторая информация была получена в результате обмена данными с рядом стран-членов ВМО. Таким образом был скомплектован массив норм температуры воздуха за 1961–1990 гг. по 1728 станциям Северного полушария.

Оперативная база данных — это макеты «MIDL» базы данных «SHOT», в которых содержатся среднемесячные значения температуры воздуха в коде «CLIMAT» и среднемесячные значения, полученные в результате осреднения данных, поступивших в коде «SYNOP». За сутки в Гидрометцентр России поступает около 8000 телеграмм в коде «SYNOP», которые содержат наблюдения над температурой воздуха на уровне станции ( $h = 2$  м).

Далее в рамках технологии экспресс-мониторинга для суши и океана используется разная методика.

Для суши по методу, разработанному А.Н. Багровым, осуществляется расчет среднесуточных значений температуры воздуха по всем станциям земного шара, данные с которых поступают в Гидрометцентр России. Перед осреднением данные наблюдений подвергаются контролю. Естественно, что наилучшие результаты осреднения получаются для тех станций, где имеются правильные наблюдения за все восемь сроков. Надо сказать, что наблюдения температуры имеют сравнительно небольшой процент ошибок ( $\sim 0,1\%$ ), и в большинстве случаев их несложно выявить. Для контроля применяется метод «скользящего осреднения».

Для этого используются восемь значений температуры за проверяемые сутки, два значения за 18 и 21 ч предыдущих и еще два значения за 00 и 03 ч последующих суток. Значение температуры за какой-либо срок сравнивается с полусуммой значений за соседние сроки, и если разница превосходит некоторый допустимый порог, то оно бракуется. По принятым значениям вычисляется среднесуточная температура. Если пропущены два срока наблюдений подряд, то контроль не осуществляется и среднесуточная температура не вычисляется. Для станций с восьмисрочными наблюдениями такой контроль работает довольно надежно и хорошо отбраковывает случайные грубые и средние ошибки. Для станций с четырехразовыми наблюдениями порог увеличен, и контроль работает менее надежно.

При осреднении за месяц привлекаются все принятые среднесуточные значения, входящие в этот интервал. Окончательно полученный результат используется в дальнейших расчетах, если число среднесуточных значений температуры в месяце не менее  $(K-2)$ , где  $K$  — число дней в месяце.

Проведенные сравнения полученных таким способом значений среднемесячной температуры с аналогичными значениями, вычисленными непосредственно на станциях и поступивших в Гидрометцентр России в сводках «CLIMAT», показали, что примерно для 96–98 % станций разница не превышает  $\pm 0,1$  °C. Сравнения осуществлялись на протяжении десяти лет и эпизодически продолжаются по настоящее время по 750 станциям. Таким образом, предложенный способ осреднения данных о температуре воздуха на станциях позволяет получить довольно надежную информацию о среднемесячной температуре сразу по окончании периода осреднения. Вместе с тем, если к моменту начала расчетов по экспресс-мониторингу, т. е. 2-го числа, поступили данные в сводке «CLIMAT», то приоритет отдается им. Далее, используя осредненные за месяц данные и нормы, вычисляются аномалии среднемесячной температуры воздуха, которые методом оптимальной интерполяции интерполируются в сетку  $5^\circ \times 5^\circ$  по Северному полушарию.

При интерполяции в узел сетки привлекаются данные восьми ближайших и, по возможности, симметрично расположенных станций. Симметричность расположения устанавливается с помощью специальной программы. В качестве поля первого приближения для

отклонений температуры от норм берется нулевое поле. Рассчитывается корреляционная функция для приземной температуры воздуха (она близка к нулю для расстояний, больших  $\sim 1500$  км). Для каждого узла сетки строится корреляционная матрица и решается система линейных уравнений до восьмого порядка, откуда и находятся интерполяционные веса каждой станции. Метод неплохо работает в хорошо освещенных данными районах, но, например, в Африке, где станций мало, возможны искажения, так как в этом случае чаще всего вместо интерполяции имеет место экстраполяция. Таким образом, сразу по завершении месяца рассчитываются аномалии среднемесячной температуры в узлах сетки  $5^\circ \times 5^\circ$  по суше.

Для океанов используются результаты объективных анализов температуры воздуха на уровне моря за все сроки наблюдений, затем они осредняются за месяц. (Метод объективного анализа рекомендован к использованию решением ЦМКП от 21.10.2011 г.) Результаты объективных анализов размещены в базе «FAMN». Далее для океанов в узлах сетки  $5^\circ \times 5^\circ$  рассчитываются аномалии температуры воздуха на уровне моря. В качестве норм используются 12 карт норм температуры воздуха (1961–1990 гг.) по Северному полушарию, созданные Е.В. Балашовой. Основой для построения карт являлись бланки МПК-6, масштаб 1:30 000 000.

Объединение аномалий, рассчитанных отдельно для суши и моря, осуществляется с помощью специальной «маски» суша-море, и это позволяет в кратчайший срок, как правило, 2-го числа, иметь необходимую информацию об аномалиях среднемесячной температуры воздуха по всему Северному полушарию за завершившийся месяц. Каждое новое поле объединенных аномалий подвергается визуальному контролю специалиста.

На основе предложенного метода осуществляется пополнение исторической информационной базы начиная с 1996 года.

Таким образом, после завершения соответствующего временного периода (месяц, сезон, год) у исследователя в каждом узле  $5^\circ \times 5^\circ$  имеется информация об аномалиях среднемесячной температуры воздуха с января 1891 года по прошедший месяц.

### **Осреднение по регионам и ранжирование результатов**

Для экспресс-мониторинга климатических аномалий температуры воздуха выбрано 20 регионов (табл. 1).

Таблица 1

## Список регионов и число узлов в каждом из них

| Название региона                                   | Кол-во узлов<br>( $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ ) | Примечание        |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------|
| Северное полушарие                                 | 1225                                             |                   |
| Россия                                             | 140                                              |                   |
| Северо-Западный<br>федеральный округ               | 17                                               |                   |
| Центральный<br>федеральный округ                   | 4                                                |                   |
| Южный федеральный округ                            | 4                                                |                   |
| Приволжский<br>федеральный округ                   | 8                                                |                   |
| Уральский федеральный округ                        | 17                                               |                   |
| Сибирский федеральный округ                        | 42                                               |                   |
| Дальневосточный<br>федеральный округ (сев. часть)  | 47                                               |                   |
| Дальневосточный<br>федеральный округ (южная часть) | 11                                               |                   |
| Северо-Кавказский<br>федеральный округ             | 2                                                |                   |
| Канада                                             | 81                                               |                   |
| США (без Аляски)                                   | 43                                               |                   |
| США (штат Аляска)                                  | 17                                               |                   |
| Китай                                              | 40                                               |                   |
| Индия                                              | 17                                               |                   |
| Европа (без ЕТР)                                   | 39                                               |                   |
| Северная Африка                                    | 71                                               |                   |
| Арктика                                            | 288                                              |                   |
| Москва                                             | —                                                | Син. индекс 27612 |

Поскольку границы большинства регионов не совпадают с параллелями и меридианами сетки  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ , то узлы, определяющие эти регионы, входят в регион с разными весами. В центре региона они имеют, как правило, вес, равный 1, а вдоль границ – меньше 1.

Средняя температура воздуха и аномалия температуры воздуха за каждый месяц периода (1891 г. – настоящее время) рассчитывается как среднее значение величин в узлах сетки  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ , включенных в данный регион, а именно:

$$X_{m,r} = \frac{\left[ \sum_i V_i \cdot X_i \cdot \cos \varphi_i \right]}{\sum_i V_i \cdot \cos \varphi_i},$$

где  $X_{m,r}$  — средняя температура воздуха по региону  $r$  за  $m$ -ый месяц;  $X_i$  — значения среднемесячной температура воздуха в узлах сетки  $5^\circ \times 5^\circ$  региона;  $V_i$  — вес значения узла в регионе, заданный отдельной таблицей для каждого региона.

Таким образом, создается и пополняется база региональных статистик (средние значения и аномалии температуры воздуха) по каждому региону за все месяцы, начиная с января 1891 г. и заканчивая завершившимся текущим месяцем. По завершению очередного месяца база пополняется. Происходит это 2-го числа следующего месяца. В этот же срок рассчитывается ранг температуры воздуха за прошедший месяц в сравнении с другими значениями начиная с 1891 г. Он также сохраняется в базе. Ранг — это порядковый номер температуры в ряду данных с 1891 г. Первый ранг, т. е. высший, имеет самая большая температура (максимум в ряду), низший — самая маленькая (минимум в ряду). Таким образом, 2-го числа месяца, следующего за истекшим периодом (месяц, сезон, год), имеется возможность ответить на вопрос: каким был этот период — экстремально теплым, экстремально холодным, близким к экстремуму или к норме.

В табл. 2 показан пример рассчитанных региональных статистик за август 2014 года.

Таблица 2

**Региональные статистики. Средние температуры воздуха (0,1°)  
и аномалии (0,1°). Август 2014 г.**

| Регион                               | Год  | Период  | Т возд. | Аномалия | Ранг |
|--------------------------------------|------|---------|---------|----------|------|
| Северо-Западный<br>федеральный округ | 2014 | Август  | 149     | 20       | 14   |
|                                      |      | Лето    | 138     | 7        | 40   |
|                                      |      | Накопл. | 41      | 23       | 5    |
| Центральный<br>федеральный округ     | 2014 | Август  | 207     | 21       | 14   |
|                                      |      | Лето    | 199     | 10       | 23   |
|                                      |      | Накопл. | 103     | 25       | 7    |
| Южный<br>федеральный округ           | 2014 | Август  | 273     | 38       | 4    |
|                                      |      | Лето    | 253     | 20       | 5    |
|                                      |      | Накопл. | 144     | 16       | 4    |

Таблица 2 (продолжение)

| Регион                                                   | Год  | Период  | Т возд. | Аномалия | Ранг |
|----------------------------------------------------------|------|---------|---------|----------|------|
| Приволжский<br>федеральный округ                         | 2014 | Август  | 232     | 32       | 6    |
|                                                          |      | Лето    | 218     | 10       | 34   |
|                                                          |      | Накопл. | 89      | 15       | 17   |
| Уральский<br>федеральный округ                           | 2014 | Август  | 154     | 14       | 23   |
|                                                          |      | Лето    | 147     | —4       | 79   |
|                                                          |      | Накопл. | 10      | 8        | 33   |
| Сибирский<br>федеральный округ                           | 2014 | Август  | 141     | 12       | 17   |
|                                                          |      | Лето    | 150     | 13       | 8    |
|                                                          |      | Накопл. | —25     | 19       | 5    |
| Дальневосточный<br>федеральный округ<br>(северная часть) | 2014 | Август  | 125     | 31       | 1    |
|                                                          |      | Лето    | 109     | 19       | 5    |
|                                                          |      | Накопл. | —22     | 27       | 1    |
| Дальневосточный<br>федеральный округ<br>(южная часть)    | 2014 | Август  | 186     | 22       | 3    |
|                                                          |      | Лето    | 173     | 20       | 5    |
|                                                          |      | Накопл. | 33      | 19       | 4    |
| Россия                                                   | 2014 | Август  | 158     | 19       | 2    |
|                                                          |      | Лето    | 154     | 12       | 9    |
|                                                          |      | Накопл. | 11      | 20       | 5    |
| Канада                                                   | 2014 | Август  | 139     | 14       | 5    |
|                                                          |      | Лето    | 135     | 14       | 5    |
|                                                          |      | Накопл. | —15     | 10       | 18   |
| США (без Аляски)                                         | 2014 | Август  | 269     | 3        | 37   |
|                                                          |      | Лето    | 266     | 5        | 24   |
|                                                          |      | Накопл. | 181     | 7        | 24   |
| США (штат Аляска)                                        | 2014 | Август  | 126     | 17       | 8    |
|                                                          |      | Лето    | 115     | 9        | 22   |
|                                                          |      | Накопл. | 21      | 24       | 5    |
| Китай                                                    | 2014 | Август  | 289     | 1        | 75   |
|                                                          |      | Лето    | 292     | 5        | 24   |
|                                                          |      | Накопл. | 200     | 9        | 11   |
| Индия                                                    | 2014 | Август  | 302     | 8        | 4    |
|                                                          |      | Лето    | 312     | 10       | 1    |
|                                                          |      | Накопл. | 280     | 5        | 14   |

Таблица 2 (окончание)

| Регион                              | Год  | Период  | Т возд. | Аномалия | Ранг |
|-------------------------------------|------|---------|---------|----------|------|
| Европа (без ЕТР)                    | 2014 | Август  | 201     | 7        | 44   |
|                                     |      | Лето    | 199     | 11       | 13   |
|                                     |      | Накопл. | 139     | 20       | 1    |
| Северная Африка                     | 2014 | Август  | 322     | 26       | 23   |
|                                     |      | Лето    | 312     | 22       | 32   |
|                                     |      | Накопл. | 250     | 24       | 2    |
| Арктика                             | 2014 | Август  | 54      | 21       | 4    |
|                                     |      | Лето    | 48      | 18       | 8    |
|                                     |      | Накопл. | –86     | 29       | 3    |
| Северо-Кавказский федеральный округ | 2014 | Август  | 279     | 54       | 3    |
|                                     |      | Лето    | 260     | 37       | 2    |
|                                     |      | Накопл. | 146     | 19       | 5    |
| Северное полушарие                  | 2014 | Август  | 236     | 12       | 1    |
|                                     |      | Лето    | 231     | 12       | 1    |
|                                     |      | Накопл. | 173     | 12       | 1    |
| Москва                              | 2014 | Август  | 192     | 28       | 7    |
|                                     |      | Лето    | 188     | 17       | 16   |
|                                     |      | Накопл. | 90      | 26       | 3    |

*Примечание.* Накопл. — средняя температура, аномалия и ранг за период с января по завершившийся месяц. В данном случае с января 2014 г. по август 2014 г.

Ранг температуры воздуха помещается в специальную таблицу, из которой хорошо видно, в каких регионах были достигнуты экстремальные значения температуры воздуха. Пример такой таблицы за 2015 г. представлен в табл. 3. Аналогичная таблица составляется и по регионам Северного полушария (табл. 4).

Кроме таблицы информация о температуре воздуха, в случае экстремальных значений или близких к ним, может сопровождаться, например, диаграммами (рис. 1) или картами (рис. 2).

Диаграмма, дополняя содержание табл. 3 и 4, позволяет проследить, например, за тенденциями межгодовых изменений температуры, хотя это не является основной целью экспресс-мониторинга, а карта, в случае экстремальных событий, дает представление об их пространственной локализации.

Таблица 3

**Ранг средней температуры воздуха по месяцам и за год  
за 125 лет наблюдений (1891–2015 гг.) по территории России**

| Регион                                                   | I        | II        | III        | IV | V        | VI       | VII      | VIII     | IX       | X                 | XI | XII       | Год        |
|----------------------------------------------------------|----------|-----------|------------|----|----------|----------|----------|----------|----------|-------------------|----|-----------|------------|
| Россия                                                   | 13       | <b>4</b>  | <b>6</b>   | 11 | <b>7</b> | <b>2</b> | 21       | 13       | <b>6</b> | 45                | 40 | <b>4</b>  | 2          |
| Северо-Западный<br>федеральный округ                     | 47       | <b>4</b>  | <b>2</b>   | 12 | <b>2</b> | 18       | 112      | 48       | <b>3</b> | 66                | 24 | <b>7</b>  | <b>1</b>   |
| Центральный<br>федеральный округ                         | <b>7</b> | 11        | <b>7</b>   | 37 | 41       | 27       | 68       | 29       | <b>4</b> | 99                | 16 | <b>2</b>  | <b>1</b>   |
| Южный<br>федеральный округ                               | 38       | 48        | 28         | 72 | 25       | <b>4</b> | 31       | 18       | <b>3</b> | 114               | 33 | <b>10</b> | <b>5</b>   |
| Северо-Кавказский<br>федеральный округ                   | 87       | 93        | 64         | 58 | 34       | <b>3</b> | <b>8</b> | 15       | <b>3</b> | <i><b>118</b></i> | 80 | 38        | 13         |
| Приволжский<br>федеральный округ                         | 34       | 13        | 27         | 48 | 19       | <b>3</b> | 78       | 81       | <b>3</b> | 99                | 15 | <b>1</b>  | <b>5</b>   |
| Уральский<br>федеральный округ                           | 55       | <b>8</b>  | <b>6</b>   | 11 | <b>1</b> | <b>4</b> | 95       | 112      | 47       | 94                | 61 | 13        | <b>6</b>   |
| Сибирский<br>федеральный округ                           | 17       | <b>9</b>  | <b>9</b>   | 12 | 19       | <b>6</b> | <b>6</b> | 11       | 31       | 30                | 37 | 10        | <b>1–3</b> |
| Дальневосточный<br>федеральный округ<br>(северная часть) | 13       | 25        | 55         | 39 | 34       | <b>2</b> | <b>5</b> | 18       | 20       | 13                | 89 | 108       | 15         |
| Дальневосточный<br>федеральный округ<br>(южная часть)    | 14       | <b>2</b>  | <b>2</b>   | 23 | 32       | 30       | <b>7</b> | <b>5</b> | 14       | 40                | 61 | <b>7</b>  | <b>1</b>   |
| Москва                                                   | 18       | <b>10</b> | <b>4–6</b> | 41 | 29       | 30       | 60       | 32       | <b>4</b> | 73                | 23 | <b>2</b>  | 1          |

*Примечание.* Во 2–14-ом столбцах представлен ранг средней температуры воздуха за 125 лет наблюдений (1 – максимум средней температуры, 125 – минимум средней температуры). Жирным шрифтом отмечены десять самых теплых периодов года, жирным курсивом – самых холодных.

Таблица 4

**Ранг средней температуры воздуха по месяцам и за год за 124 года наблюдений  
(1891–2014 гг.) по Северному полушарию Земли**

| Регион              | I  | II | III      | IV       | V        | VI       | VII      | VIII     | IX | X        | XI  | XII      | Год        |
|---------------------|----|----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----|----------|-----|----------|------------|
| Россия              | 80 | 32 | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>5</b> | 12–15    | 27       | <b>2</b> | 36 | 86       | 43  | 21       | <b>6–7</b> |
| Канада              | 20 | 50 | 90       | 84       | 16       | <b>7</b> | <b>9</b> | <b>5</b> | 31 | 16       | 82  | 27       | 20         |
| США (без<br>Аляски) | 61 | 47 | 57       | 17       | 18       | 18–21    | 38       | 37       | 11 | <b>4</b> | 109 | <b>3</b> | 13         |

Таблица 4 (окончание)

| Регион             | I  | II  | III | IV  | V   | VI  | VII | VIII | IX  | X   | XI | XII | Год |
|--------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|----|-----|-----|
| США (штат Аляска)  | 1  | 59  | 24  | 22  | 9   | 56  | 36  | 8    | 10  | 91  | 6  | 8   | 2–4 |
| Китай              | 17 | 77  | 6   | 12  | 9   | 18  | 24  | 75   | 9   | 5   | 13 | 68  | 7   |
| Индия              | 51 | 87  | 44  | 22  | 48  | 2–6 | 3   | 4    | 22  | 17  | 20 | 99  | 14  |
| Европа (без ЕТР)   | 4  | 1–2 | 1   | 2–3 | 43  | 12  | 6   | 44   | 11  | 3   | 3  | 25  | 1   |
| Северная Африка    | 6  | 28  | 30  | 4   | 5   | 50  | 29  | 23   | 1   | 20  | 16 | 63  | 2   |
| Арктика            | 18 | 5   | 2   | 5   | 5   | 13  | 14  | 4    | 9   | 11  | 22 | 22  | 4   |
| Северное полушарие | 3  | 14  | 4   | 2   | 3–6 | 1–3 | 3   | 1–2  | 2–6 | 2–4 | 5  | 1–3 | 2   |

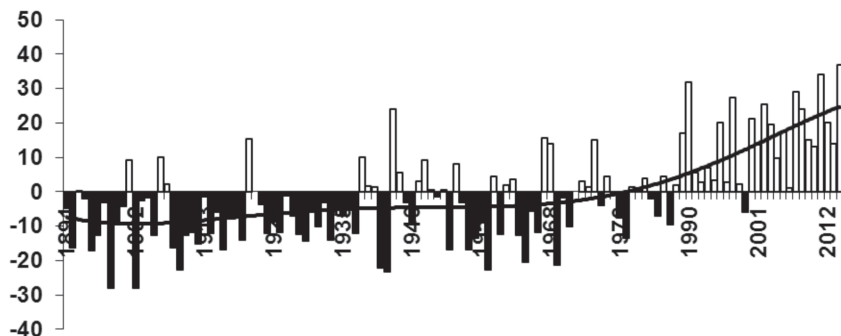
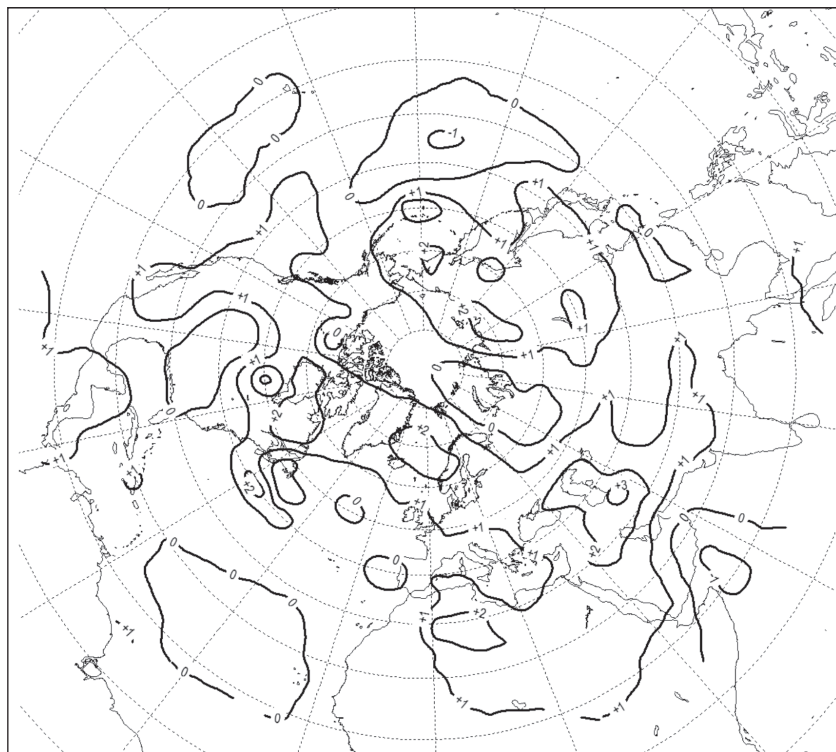


Рис. 1. Аномалии средней температуры воздуха (0,1 °C) в России весной 1891–2014 гг.

Краткие предварительные результаты экспресс-мониторинга 2–3-го числа месяца, следующего за истекшим периодом (месяц, сезон, год), размещаются на сайте Гидрометцентра России в разделе «Новости»: <http://www.meteoinfo.ru/news>, а 7–8-го числа этого же месяца более полная версия с анализом погодно-климатических условий за истекший период – в разделе «Климат»: <http://www.meteoinfo.ru/climate>. Примерно через 5–7 дней после этого информация доступна в англоязычной версии.



**Рис. 2. Аномалии средней температуры воздуха (°C) летом 2014 г.  
на Северном полушарии Земли.**

### **Сравнение результатов экспресс-мониторинга с другими источниками информации**

Объективные трудности представляет сравнение полученных результатов с аналогичными или близкими к ним по смыслу в других источниках информации. Во-первых, потому что их не так много. По Северному полушарию это может быть, например, информация на сайте NOAA (NCDC Climate Monitoring) — доступна не ранее 18–20-го числа месяца, следующего за истекшим периодом, а по территории Российской Федерации — в материалах ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН». Во-вторых, методы анализа (списки используемых станций, методы

осреднения, периоды для расчета норм) далеко не всегда совпадают, поэтому прямое сравнение результатов по рассчитанным средним значениям или вычисленным аномалиям некорректно. Для этой цели может использоваться ранг рассчитанной температуры воздуха, поскольку, если она была экстремальной или близкой к ней, этот факт должен быть выявлен при любом методе анализа.

В табл. 5 представлены результаты ранжирования средней температуры воздуха по Северному полушарию по данным сайтов Гидрометцентра России и NOAA за 2014–2016 годы.

*Таблица 5*

**Ранг средней температуры воздуха по Северному полушарию по месяцам и за год по данным NOAA (расчеты проводятся с точностью до 0,01°) и Гидрометцентра России (расчеты проводятся с точностью до 0,1°) за период с 1891 г. по текущий год**

| Сайт                  | I   | II   | III | IV  | V   | VI | VII | VIII | IX  | X   | XI  | XII | Год |
|-----------------------|-----|------|-----|-----|-----|----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| <b>2014 г.</b>        |     |      |     |     |     |    |     |      |     |     |     |     |     |
| NOAA                  | 4   | 29   | 5   | 1   | 3   | 1  | 5   | 1    | 2   | 3   | 9   | 1   | 1   |
| Гидромет-центр России | 3–5 | 9–11 | 1   | 4–6 | 4–8 | 3  | 1–6 | 1–2  | 1–6 | 3–6 | 6–7 | 1   | 1   |
| <b>2015 г.</b>        |     |      |     |     |     |    |     |      |     |     |     |     |     |
| NOAA                  | 2   | 3    | 2   | 5   | 1   | 1  | 1   | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   |
| Гидромет-центр России | 2   | 2    | 1–2 | 4–7 | 1   | 1  | 1   | 1–2  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   |
| <b>2016 г.</b>        |     |      |     |     |     |    |     |      |     |     |     |     |     |
| NOAA                  | 1   | 1    | 1   | 1   | 2   | 1  | 1   | 1    | 1   | 4–5 |     |     |     |
| Гидромет-центр России | 1   | 1    | 1   | 1   | 1–2 | 1  | 1   | 1    | 1–2 | 2–3 |     |     |     |

Что касается территории Российской Федерации, то результаты экспресс-мониторинга можно сравнить с данными представленными на сайте ИГКЭ Росгидромета и РАН (табл. 6 и 7).

Таблица 6

**Ранг средней температуры воздуха за год по территории России  
по данным Гидрометцентра России и ИГКЭ Росгидромета и РАН**

| Сайт                 | 2011 г. | 2012 г. | 2013 г. | 2014 г. | 2015 г. |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Гидрометцентр России | 4       | 7       | 6       | 7       | 2       |
| ИГКЭ                 | 5       | 12      | 6       | 8       | 1       |

Таблица 7

**Ранг средней температуры воздуха по территории России за 2016 г.  
по данным Гидрометцентра России и ИГКЭ Росгидромета и РАН**

| Сайт                 | Зима | Весна | Лето | VI  | VII | VIII |
|----------------------|------|-------|------|-----|-----|------|
| Гидрометцентр России | 1    | 3     | 1    | 2–3 | 2–4 | 1    |
| ИГКЭ                 | 2    | 3     | 1    | 5   | 5   | 1    |

Авторы технологии: А.Н. Багров (расчеты среднемесячных значений и аномалий температуры воздуха по станциям, интерполяция в узлы сетки  $5^\circ \times 5^\circ$ , объединение данных по суше и океанам), Е.В. Балашова (подготовка норм температуры воздуха по станциям, создание карт норм температуры воздуха по Северному полушарию), Б.А. Бирман (постановка задачи, выбор регионов, контроль и ранжирование результатов расчета аномалий, создание выходной продукции: таблицы, диаграммы, карты, информация для сайта Гидрометцентра России), Ю.А. Краюшкин (разработка оригинальных программных средств для переинтерполяции аномалий температуры воздуха в исторической базе данных, а также для осреднения по регионам и ранжированию результатов). На программу «Оптимальная статистическая интерполяция с последовательными коррекциями» получено свидетельство о регистрации в Роспатенте (№ 2016610906 от 21.01.2016 г.).

**Список литературы**

1. Climatological normals (CLINO) for the period 1961–1990 // WMO, No 847. – Geneva, 1996.

*Г.С. Ривин, И.А. Розинкина, А.Н. Багров, Д.В. Блинов,  
А.А. Кирсанов, Е.В. Кузьмина, М.В. Шатунова, М.М. Чумаков,  
Д.Ю. Алферов, А.Ю. Бундель, М.Ю. Зайченко, М.А. Никитин*

## **МЕЗОМАСШТАБНАЯ МОДЕЛЬ COSMO-RU2 И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕЕ ОПЕРАТИВНЫХ ИСПЫТАНИЙ**

### **Введение**

Начиная с сентября 2009 г. в Гидрометцентре России функционирует система COSMO-Ru [8] численного краткосрочного прогноза погоды на базе негидростатической модели COSMO атмосферы и деятельного слоя почвы [13] одноименного европейского метеорологического консорциума COSMO [11].

Метеорологические службы, входящие в состав консорциума COSMO, развивают и поддерживают модель COSMO. По правилам консорциума к названию модели при ее использовании в оперативной практике добавляют название своей страны, чтобы более или менее однозначно понимать территорию для численного прогноза и выбранные опции модели COSMO (параметризации, метод решения, область использованного гало для граничных условий и т. д.).

По этой причине оперативная версия модели COSMO, используемая в России, имеет имя COSMO-Ru. Заметим, что имя COSMO-Ru имеет и оперативная система краткосрочного прогноза погоды ФГБУ «Гидрометцентр России» для ограниченной территории, включающая в себя в качестве одной из компонент модель COSMO-Ru. Остальные компоненты системы COSMO-Ru связаны с разработанной технологической линией приема, циклической архивации и хранения начальных и граничных данных, организацией автоматической визуализации прогностической продукции (в сутки ежедневно подготавливается около 8000 метеорологических карт и 1000 метеограмм), автоматической

рассылкой многочисленным пользователям как визуализированной продукции, так и файлов в коде GRIB1 (в дальнейшем запланирован переход на код GRIB2).

Для стран, входящих в консорциум, и для стран, не входящих в состав консорциума COSMO, но имеющих лицензию (бесплатную для развивающихся стран и платную для остальных), Немецкая служба погоды (DWD) предоставляет в оперативном режиме в коде GRIB2 начальные и боковые условия из своей оперативной системы – результаты прогноза негидростатической (первой в мире!) глобальной модели ICON [15] с шагом сетки 6,5 км для пяти регионов, в том числе для всей Европы, и 13 км – для остальной части Земли. Модель ICON 20 января 2015 г. заменила квазистатическую глобальную модель GME.

Метеослужбы стран, входящих в консорциум COSMO, в едином согласованном формате обмениваются данными об успешности прогнозирования на основе модели COSMO в рамках своих национальных технологий. Сходство климатических условий России и стран европейского консорциума позволяет с доверием относиться к новым версиям модели, прошедшим тестирование в рамках консорциума, при их реализации для прогнозирования по территории России.

Различия в национальных технологиях, реализуемых на базе модели COSMO странами-членами консорциума, заключаются в особенностях использования начальной информации. В настоящее время это осуществляется только на базе глобальной системы усвоения с учетом дополнительного регионального усвоения данных, главным образом синоптических и радарных.

Для понимания качества прогнозирования начиная с 2008 г. проводились авторские испытания версии COSMO-Ru для различных территорий и шагов сетки, показавшие достаточно высокий уровень успешности и информативности прогнозирования, особенно элементов приземной погоды. На основе совместного анализа с синоптиками Гидрометцентра России был выявлен ряд особенностей продукции мезомасштабного моделирования, ее интерпретации, представления результатов и оценок успешности. Отметим, что ранее прогнозисты Росгидромета не имели опыта работы с продукцией мезомасштабного моделирования.

Оперативные испытания технологии COSMO-Ru проводились в Гидрометцентре России по существующим в настоящее время нормативам оценок численных и общего назначения прогнозов погоды для теплого и холодного периодов.

13 апреля 2011 г. Центральная методическая комиссия по гидрологическим и метеорологическим прогнозам Росгидромета (ЦМКП), рассмотрев оперативные испытания системы в Гидрометцентре России для теплого (с 1 мая по 30 сентября 2010 г.) и холодного (с 1 октября 2010 г. по 25 марта 2011 г.) периодов решила [6] рекомендовать ФГБУ «Гидрометцентр России» внедрить в оперативную практику в качестве базовой модель COSMO-Ru7 для численного прогнозирования следующих метеорологических величин (полей и метеограмм): осадков, температуры и влажности воздуха, фонового приземного ветра, подготовить технологию распространения прогностической продукции модели COSMO-Ru7 в прогностические подразделения УГМС/ЦГМС Европейской территории России и рекомендовать оперативно-прогностическим подразделениям Росгидромета использовать в практической работе выходную продукцию мезомасштабной модели COSMO-Ru7.

В данной статье приводятся результаты оперативных испытаний прогнозов системы COSMO-Ru для Центрального федерального округа (ЦФО) и Северного Кавказа с шагом сетки 2,2 км.

## **1. Система моделирования COSMO-Ru**

### **1.1. Краткие сведения о консорциуме COSMO**

Международный консорциум COSMO (the Consortium for Small-scale Modelling) [11] был основан в 1998 году метеослужбами Германии, Греции, Италии и Швейцарии. Позднее к COSMO присоединились метеослужбы Польши (2002 г.), Румынии (2009 г.), России (2009 г.) и Израиля (с 1 января 2017 г.).

Основная цель консорциума COSMO – развивать и поддерживать оперативную негидростатическую модель атмосферы для прогноза погоды для ограниченной территории. В основу негидростатической мезомасштабной модели, развиваемой этим консорциумом, легла разработанная в Метеослужбе Германии первая в мире оперативная негидростатическая мезомасштабная модель LM (Lokal Modell) с шагом

сетки 7 км [14] (оперативное использование для выпуска прогнозов по Европе с 1999 г.). Впоследствии вместо названия LM по решению консорциума стало употребляться название модели COSMO, одноименное с названием консорциума.

В настоящее время выпуск оперативных прогнозов на основе модели COSMO в части стран-членов (Германии, Польши, России и Румынии) консорциума базируется на применении данных для начальных и боковых граничных условий, полученных с помощью глобальной модели атмосферы ICON [15], в остальных – на прогнозах спектральной квазистатической глобальной модели IFS ЕЦСПП (Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды), имеющей шаг сетки 9 км.

Обязательным условием участия национальных метеослужб в составе консорциума является непосредственное участие специалистов этих метеослужб в разработке алгоритмов и технологий моделирования COSMO. Это условие является большим стимулом для специалистов из стран-участниц консорциума для работы над усовершенствованием модели на основе глубокого понимания алгоритмов, программного обеспечения самой модели и сопутствующих технологий (верификации, регионального усвоения данных, управления выполнением задач, диагностических расчетов и т. д.). Это открывает возможность активного применения самых последних результатов мирового метеорологического сообщества в данной области с быстрой его реализацией в национальных прогностических технологиях.

## **1.2. Общая характеристика модели COSMO**

Негидростатическая атмосферная модель COSMO основана на системе термогидродинамических уравнений, описывающих сжимаемый поток воздуха во влажной атмосфере. На сайте консорциума COSMO [12] приведена подробная документация математического описания модели, конечно-разностного метода решения, физического и химического блоков, системы усвоения данных наблюдений, блока подготовки начальной информации, а также руководство по применению модели COSMO.

Уравнения модели COSMO-Ru записываются в системе координат, образованной сферической системой координат со смещенным

северным полюсом по задаваемому меридиану и орографической («terrain-following») вертикальной координатой, связанной с высотой. В консорциуме в настоящее время используются версии модели с шагами сетки по пространству от 1,1 до 13 км.

### **1.2.1. Основные уравнения модели COSMO**

Основные уравнения модели COSMO приведены в [8, 9]. Метод решения конечно-разностного аналога этой системы уравнений является вариантом Викера—Скамарока метода расщепления по физическим процессам Г.И. Марчука. Этот вариант Викера—Скамарока связан с расщеплением системы уравнений на две системы: одна связана с быстрыми акустическими и гравитационными волнами и силой плавуности, а вторая — с медленными атмосферными процессами, определяющими качество прогнозов. По времени используется трехшаговый метод Рунге—Кутты, адвективные члены аппроксимируются с 5-м порядком. Для конвективных членов применяется явно-неявный метод, а для диффузионных членов — метод Кранка—Николсона.

Подробное изложение дано в [10, 14] и приведенных в них ссылках.

### **1.2.2. Начальные и граничные условия**

При моделировании на ограниченной территории лишь нижняя граница является физической. Верхняя и боковая границы области моделирования обычно задаются искусственно, и условия на них могут быть заданы в зависимости от нужд конкретного приложения.

Начальные и граничные условия в технологиях регионального моделирования COSMO задаются интерполяцией данных, полученных из глобальной модели или варианта модели COSMO с большим шагом сетки. В настоящее время возможно использование данных четырех глобальных моделей, а именно:

- 1) Немецкой службы погоды (конечно-разностная негидростатическая модель ICON с неравномерной сеткой с шагами 6,5 и 13 км);
- 2) ЕЦСПП (спектральная квазистатическая модель IFS, шаг сетки 9 км);
- 3) Национальных центров прогноза окружающей среды США (спектральная квазистатическая модель GFS, шаг сетки 13 км);
- 4) Метеорологической администрации Японии (спектральная квазистатическая модель GSM, шаг сетки примерно 18 км).

### 1.2.3. Основные работы по развитию системы COSMO-Ru

В последние годы в Гидрометцентре России проведены следующие работы по развитию системы COSMO-Ru (ссылки на соответствующие статьи приведены в [8]):

- разработана технологическая линия, включая препроцессинг и постпроцессинг (циклическая архивация, визуализация, подготовка и распространение результатов);

- разработаны новые и предложены модификации ряда параметризаций физических процессов, используемых в модели в атмосфере и деятельном слое суши;

- проведена работа по адаптации химического блока COSMO-ART к системе COSMO-Ru, организации ежедневных прогнозов COSMO-Ru7-ART в квазиоперативном режиме;

- проведена разработка варианта усвоения данных на основе метода подталкивания;

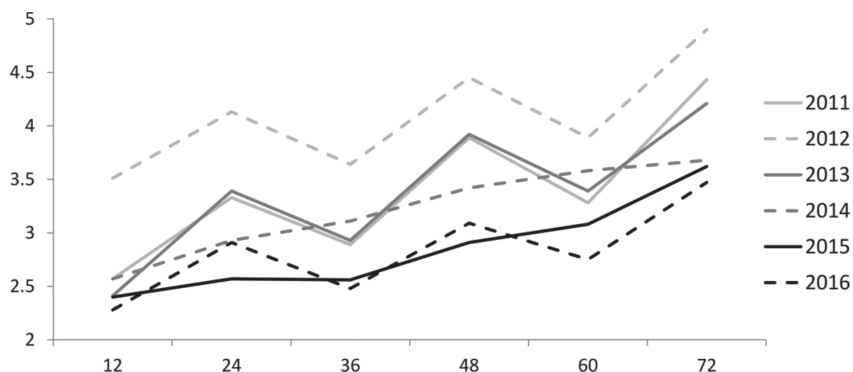
- разработана система ансамблевых прогнозов высокого разрешения для региона проведения зимних Олимпийских игр;

- проводилась непрерывная верификация прогнозов и исследование прогноза опасных метеорологических явлений для отдельных эпизодов;

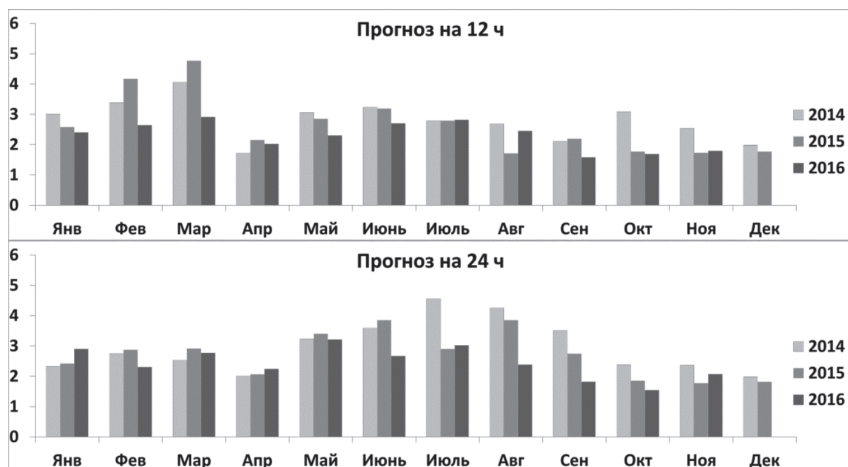
- подготовка и проведение оперативного метеорологического обслуживания прогнозами системы COASMO-Ru важнейших мероприятий в стране, например Универсиады Казань-2013, зимней Олимпиады Сочи-2014, включая подготовку новой версии COSMO-Ru с шагом сетки 1,1 км;

- подготовка новой конфигурации для краткосрочного прогноза погоды по всей территории России и ее регионов с учетом всех областей, влияющих на погоду на территории России, и проведение регулярного прогноза погоды по этой территории.

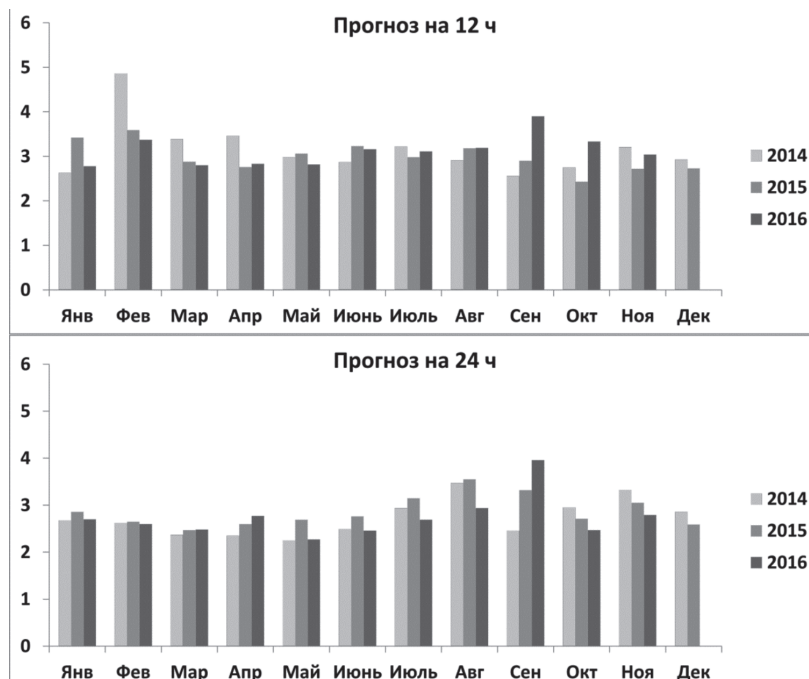
За период 2014–2016 гг. работа членов консорциума COSMO, включая и перечисленную выше, по развитию одноименной модели и системы COSMO-Ru привела к значимому повышению качества прогнозов COSMO-Ru7 и COSMO-Ru2. В прогнозах температуры, как для прогнозов с шагом 7 км, так и в прогнозах с шагом 2 км, это проявилось довольно заметно (рис. 1–3).



**Рис. 1. Эволюция среднеквадратических ошибок прогнозов COSMO-Ru значений температуры на высоте 2 м для января 2011–2016 гг. для Европейской территории России.**



**Рис. 2. Эволюция среднеквадратических ошибок прогнозов COSMO-Ru2 значений температуры на высоте 2 м для января 2014–2016 гг. для Центрального федерального округа.**



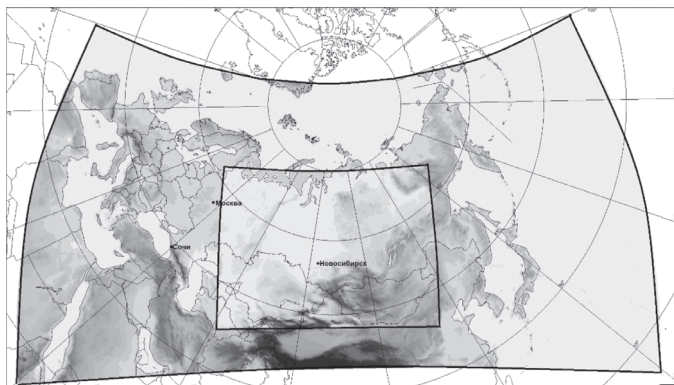
**Рис. 3. Эволюция среднеквадратических ошибок прогнозов COSMO-Ru2 значений температуры на высоте 2 м для января 2014–2016 гг. для Северного Кавказа.**

В настоящее время продолжается работа по совершенствованию модели COSMO, начата работа по подготовке к применению нового мощного суперкомпьютера.

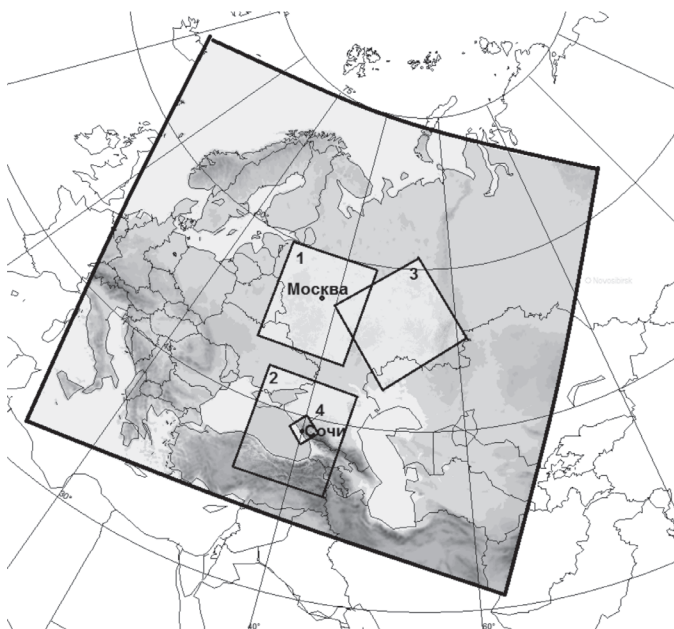
### **1.3. Технология негидростатической системы краткосрочного прогноза погоды COSMO-Ru Гидрометцентра России**

К настоящему времени на вычислительной системе Росгидромета в Москве и Новосибирске для слоя атмосферы толщиной 23 км и деятельного слоя суши толщиной 7 м функционирует разработанная технологическая линия системы COSMO-Ru для следующих территорий (рис. 4):

— Центральной и Восточной Европы, Уралу и части Западной Сибири (с запада на восток от Франции до Новосибирской области и с севера на юг от Новой Земли до Ливана), COSMO-Ru7;



а)



б)

**Рис. 4. Области интегрирования системы прогноза погоды COSMO-Ru, функционирующей в Гидрометцентре России и СибНИГМИ: версии COSMO-Ru13ENA и COSMO-Ru14Sib (а); COSMO-Ru7, COSMO-Ru2 (б) (1 – для ЦФО, 2 – для ЮВО, 3 – для ВФО) и COSMO-Ru1 (4).**

– Сибири, Урала и восточной части ЕТР (прогноз проводится только в Новосибирске), COSMO-Ru14Sib;

– часть Южного ФО (Федерального округа), прилегающая к Черному и Азовскому морям, COSMO-Ru2SFO;

– Центрального ФО, COSMO-RuCFO2;

– Европы и Северной части Азии, COSMO-Ru13ENA.

Кроме того, для метеорологического обеспечения летней Универсиады Казань-2013 и зимней Олимпиады Сочи-2014 были разработаны и применены специальные технологические линии системы COSMO-Ru для следующих территорий:

– региона с центром в Казани, COSMO-Ru2VFO;

– региона Сочи, COSMO-Ru1.

В табл. 1 указаны параметры вышеупомянутых версий модели COSMO-Ru.

*Таблица 1*

**Параметры оперативных версий модели COSMO-Ru**

| Версия модели | Размер области счета, км | Параметры сетки | Шаг сетки, км | Шаг по времени, с | Заблаговременность прогноза, ч | Время счета, мин | Источник граничных и начальных условий |
|---------------|--------------------------|-----------------|---------------|-------------------|--------------------------------|------------------|----------------------------------------|
| COSMO-Ru13ENA | 13200×6100               | 1000×500×40     | 13,2          | 120               | 99                             | 70               | ICON                                   |
| COSMO-Ru7     | 4900×4340                | 700×620×40      | 7             | 66                | 78                             | 50               | ICON                                   |
| COSMO-Ru2     | 900×1000                 | 420×470×50      | 2,2           | 18                | 42                             | 50               | COSMO-Ru7                              |
| COSMO-Ru1     | 210×210                  | 190×190×50      | 1,1           | 6                 | 36                             | 25               | COSMO-Ru2                              |
| COSMO-Ru14Sib | 5000×3500                | 380×270×40      | 13,2          | 120               | 78                             | 50               | ICON                                   |

В настоящее время система краткосрочного прогноза погоды COSMO-Ru использует версию 5.00 модели COSMO (от 08.11.2013 г.) и версию 2.00 препроцессинга (от 01.11.2013 г.). Для нахождения начальных и боковых граничных условий используются прогнозы негидростатической глобальной модели ICON. Изменения в более поздних версиях незначительны и просто связаны с исправлением ошибок,

т. к. основное внимание было направлено на развитие версии модели COSMO для графических процессоров и модели ICON-LAM.

Результаты численного прогноза погоды с помощью системы COSMO-Ru ежедневно четыре раза в сутки по начальным данным 00, 06, 12 и 18 ч ВСВ подготавливаются и пересылаются пользователям на серверы в виде файлов в коде GRIB (в различных системах вертикальных координат и различного состава в зависимости от запросов пользователей), в виде метеорологических карт (порядка 8000 карт в сутки) и метеограмм (примерно 1000 в сутки) пересылаются по электронной почте и частично выкладываются на сайтах Росгидромета, ФГБУ «Гидрометцентр России» и ФГБУ «СибНИГМИ».

Численные прогнозы COSMO-Ru проводятся параллельно прогнозам по модели ICON в Немецкой метеослужбе со сдвигом примерно 10 мин и заканчиваются менее чем через 4 часа 50 мин после соответствующего срока наблюдения, включая автоматическую подготовку карт и метеограмм и их рассылку пользователям, что свидетельствует о выполнении требований к времени выполнения оперативных численных прогнозов.

На рис. 5 приведены основные характеристики технологии COSMO-Ru Гидрометцентра России в 2016 г., а на рис. 6 – расчетные уровни модели COSMO-Ru с шагами сетки 1,1 и 2,2 км.

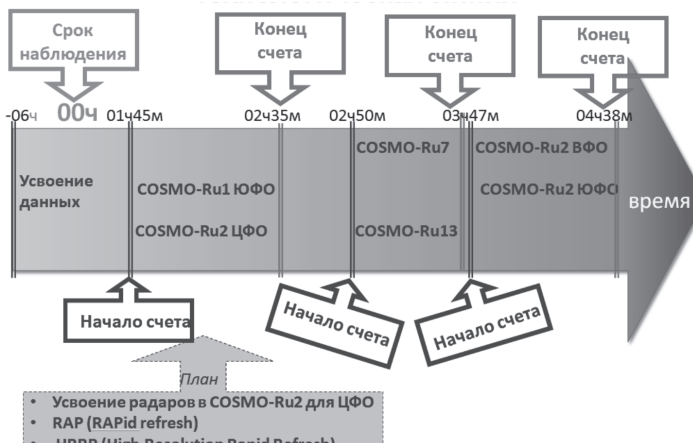


Рис. 5. Технологическая линия системы прогноза COSMO-Ru.

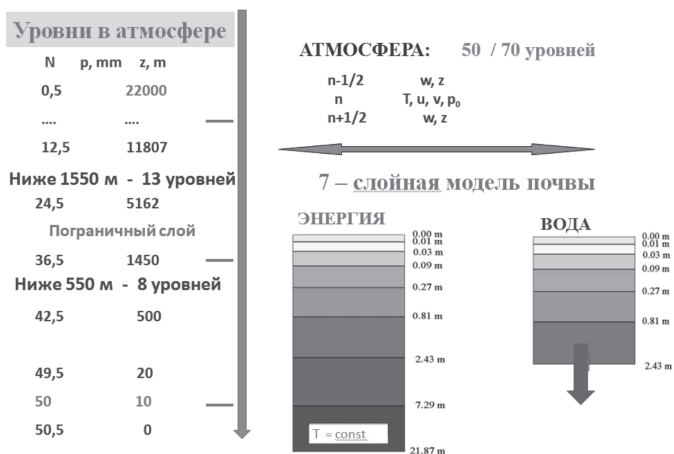


Рис. 6. Расчетные уровни модели COSMO-Ru с шагами сетки 1,1 и 2,2 км.

#### 1.4. Основные виды продукции COSMO-Ru для распространения потребителям

С момента начала функционирования технологии COSMO-Ru одним из актуальных вопросов стал вопрос об оптимальности предоставления потребителям продукции вычислений. Дело в том, что продукция мезомасштабного моделирования имеет на порядки большие объемы выходных данных (в силу высокого пространственно-временного разрешения), чем используемая традиционно продукция глобального моделирования.

Для доведения до потребителя-прогнозиста продукции моделирования высокого разрешения (передачи ее по каналам связи, визуализации системами, рассчитанными на предварительное размещение информации в пользовательских базах данных), использование стандартных традиционных подходов оперативного информационного обеспечения Росгидромета оказалось либо недостаточно эффективным, либо невозможным.

Для быстрого доведения продукции до потребителя разработчиками COSMO-Ru были предложены решения, основанные, во-первых, на использовании интернет-возможностей (ftp или электронной почты), во-вторых, распространении готовых файлов в графических форматах,

наряду с возможностями предоставления комплектов GRIB-файлов по согласованию с пользователями. Надо сказать, что подавляющее большинство пользователей – прогностических центров Росгидромета – остановили свой выбор на варианте готовой графической продукции.

Графическая продукция формируется в виде наборов карт для районов и различных комплектов прогностических полей: давления на уровне моря + осадков + облачности, высоты H500 + давления на уровне моря + приземной температуры, линий тока + модуля скорости ветра + порывов ветра и т. д. Карты формируются для прогнозов через каждые три часа для шагов сетки 7 и 13,2 км и через каждый час для шагов сетки 1,1 и 2,2 км.

Помимо карт, для пунктов производится формирование метеограмм в виде текстовых файлов и графиков временного хода метеорологических величин: скорости ветра и температуры воздуха на нескольких уровнях до высоты 5 км, высоты свежевывавшего снега, приземной точки росы, сумм осадков за час с учетом фазы, высоты условий конвекции. Кроме того, выдается информация о вертикальных профилях, различные метеорологические индексы, используемые в оперативной и исследовательской практике.

Дизайн всех видов карт и метеограмм детально обсуждался с синоптическими подразделениями Гидрометцентра России: Отдела краткосрочных прогнозов погоды и опасных явлений, Лаборатории методического сопровождения прогнозов погоды и Отдела морских гидрологических прогнозов. В ходе этих обсуждений одновременно проводился анализ информативности продукции COSMO-Ru с методической точки зрения, выявлялись основные особенности интерпретации нового вида прогнозов.

Все перечисленные виды графической продукции распространяются по FTP или электронной почте в течение десяти минут после окончания счета.

Помимо графических файлов, формируемых средствами GrADS, непосредственно после вычислений из выходных файлов модели средствами удаленного доступа производится перенос, раскодирование и запись информации в форме GRIB-файлов в пользовательские базы Гидрометцентра России, после чего продукция становится доступной всем технологиям Гидрометцентра России, сопряженным с этими базами данных.

Программы расчета оценок, по результатам которых были выполнены оперативные испытания, использовали продукцию моделирования, размещенную в пользовательских базах данных Гидрометцентра России.

Испытания технологии численного прогноза погоды (ЧПП) очень высокого пространственного разрешения (шаг сетки 2,2 км) в оперативном режиме проводились в практике Росгидромета впервые. Они делались в период с октября 2014 по сентябрь 2016 года, итоги подведены отдельно для холодного (октябрь-апрель) и теплого (май-сентябрь) периодов отдельно для территории Центральной России и Северного Кавказа. Исходный срок всех прогнозов – 00 ч ВСВ.

## **2. Сравнение успешности численных краткосрочных прогнозов погоды по территории Центральной России**

Оценка прогнозов приземной температуры и «среднего» ветра нами проводилась для заблаговременности 12 и 24 ч; осадков – для заблаговременности 18 ч. Дополнительно оценивались прогнозы сильных и очень сильных осадков и порывов ветра на текущий день. Для сравнения привлекались прогнозы четырех иностранных (UKMO – Великобритания, NCEP – США, DWD – Германия, JAPA – Япония) глобальных моделей и трех отечественных (PLAV, PLAV20 и T339) глобальных моделей, прогнозы региональной модели (REGI) и прогнозы по мезомоделям WRF-18 км и WRF-20 км (кураторы – К.Г. Рубинштейн и Л.В. Беркович), COSMO-Ru 7 км и COSMO-Ru 13 км. Приведены оценки и по «комплексному» прогнозу метеоэлементов (aUNJ) [2, 12], который основан на статистическом «комплексировании» прогнозов UKMO, NCEP, DWD и JAPA и показывает неплохие результаты. Прогностические поля UKMO, NCEP, DWD и JAPA поступают в ФГБУ «Гидрометцентр России» в широтно-долготных сетках с шагом 1, 0,5, 0,25 и 1,25°, поля PLAV – в сетке 0,9°×0,72°, поля PLAV20 с шагом ~20 км и REGI ~75 км. Заметим, что при вычислениях в зарубежных глобальных моделях используется шаг сетки 14–20 км. В них усваивается большое количество наблюдений, в том числе и недоступных в ФГБУ «Гидрометцентр России».

Во все численные модели включены совершенные системы учета разнообразных притоков тепла и неадиабатических факторов, что позволяет достаточно успешно давать прогноз различных приземных метеоэлементов. Прогностические значения приземных температуры и «среднего» ветра, осадков на проверочных станциях для каждой

модели вычислялись путем билинейной интерполяции и затем сопоставлялись с наблюдениями на этой станции.

Оценка проводилась по данным синоптических станций, расположенных на территории Центрального федерального округа (51–59° с. ш., 31–43° в. д.). Использовались ~175 станций с наблюдениями температуры и ветра и ~160 станций с наблюдениями количества осадков (часть наблюдений автоматических станций об осадках была отсеяна как недостоверные).

В табл. 2–5 представлены оценки прогнозов приземной температуры воздуха на 12 и 24 ч для холодного и теплого сезонов 2014–2016 гг. В таблицах BIAS, RMS, ABS и OTNO – арифметическая (систематическая), среднеквадратическая, абсолютная и относительная ошибки соответственно; %≤1, %≤2, %≤3, %>3 – процент прогнозов с ошибкой ≤ 1, 2, 3 °C и >3 °C; N – число станций, по которым проводилось осреднение. Несколько различное количество привлеченных станций для разных моделей объясняется отсутствием прогнозов за ту или иную дату по техническим причинам.

Таблица 2

**Оценки прогнозов приземной температуры (°C) на 12 ч  
по территории ЦФО за период октябрь – апрель 2014–2016 гг.**

| Модель      | BIAS         | RMS         | ABS         | OTNO        | %≤1       | %≤2       | %≤3       | %>3       | N            |
|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| UKMO        | –0,20        | 1,75        | 1,33        | 0,31        | 50        | 78        | 91        | 9         | 68415        |
| NCEP        | –0,82        | 2,19        | 1,59        | 0,38        | 45        | 72        | 86        | 14        | 68138        |
| DWD         | –0,92        | 2,27        | 1,66        | 0,39        | 42        | 71        | 86        | 14        | 68085        |
| JAPA        | –0,73        | 2,02        | 1,52        | 0,36        | 45        | 73        | 88        | 12        | 68556        |
| T339        | –1,58        | 3,30        | 2,44        | 0,57        | 30        | 54        | 71        | 29        | 54267        |
| PLAV        | –1,11        | 2,42        | 1,83        | 0,43        | 37        | 66        | 83        | 17        | 68423        |
| PLAV20      | –1,48        | 2,59        | 1,93        | 0,45        | 37        | 64        | 80        | 20        | 67875        |
| Regi        | –0,66        | 2,15        | 1,64        | 0,39        | 43        | 69        | 84        | 16        | 68554        |
| WRF-Ryb     | –0,78        | 2,18        | 1,60        | 0,37        | 44        | 72        | 86        | 14        | 49410        |
| WRF-Ber     | –0,95        | 2,47        | 1,81        | 0,41        | 40        | 67        | 83        | 17        | 49844        |
| COSMO-Ru13  | –1,22        | 2,58        | 1,87        | 0,44        | 40        | 66        | 82        | 18        | 65548        |
| COSMO-Ru7   | –1,16        | 2,61        | 1,90        | 0,45        | 38        | 66        | 81        | 19        | 68183        |
| COSMO-Ru2,2 | <b>–1,15</b> | <b>2,75</b> | <b>1,97</b> | <b>0,46</b> | <b>38</b> | <b>65</b> | <b>81</b> | <b>19</b> | <b>64904</b> |
| aUNJ        | <b>0,02</b>  | <b>1,55</b> | <b>1,19</b> | <b>0,28</b> | <b>53</b> | <b>82</b> | <b>94</b> | <b>6</b>  | <b>68456</b> |

Таблица 3

Оценки прогнозов приземной температуры (°C) на 24 ч  
по территории ЦФО за период октябрь–апрель 2014–2016 гг.

| Модель      | BIAS         | RMS         | ABS         | OTNO        | %≤1       | %≤2       | %≤3       | %>3       | N            |
|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| UKMO        | 1,05         | 2,51        | 1,71        | 0,57        | 48        | 72        | 83        | 17        | 68225        |
| NCEP        | −0,21        | 2,11        | 1,57        | 0,52        | 44        | 72        | 86        | 14        | 67948        |
| DWD         | −0,39        | 2,08        | 1,57        | 0,52        | 43        | 72        | 87        | 13        | 67799        |
| JAPA        | −0,60        | 2,14        | 1,59        | 0,53        | 43        | 72        | 87        | 13        | 68350        |
| T339        | −1,28        | 3,00        | 2,30        | 0,75        | 30        | 55        | 72        | 28        | 53876        |
| PLAV        | −1,69        | 2,87        | 2,42        | 0,80        | 20        | 44        | 69        | 31        | 68222        |
| PLAV20      | −0,44        | 2,65        | 2,03        | 0,67        | 32        | 60        | 79        | 21        | 67669        |
| Regi        | 0,90         | 2,54        | 1,79        | 0,59        | 44        | 69        | 82        | 18        | 68352        |
| WRF-Ryb     | −0,32        | 2,44        | 1,73        | 0,58        | 43        | 70        | 84        | 16        | 48924        |
| WRF-Ber     | −0,43        | 2,70        | 1,92        | 0,67        | 41        | 66        | 80        | 20        | 48001        |
| COSMO-Ru13  | −0,26        | 2,24        | 1,69        | 0,56        | 42        | 69        | 84        | 16        | 65511        |
| COSMO-Ru7   | −0,41        | 2,25        | 1,71        | 0,56        | 40        | 68        | 84        | 16        | 67982        |
| COSMO-Ru2,2 | <b>−0,32</b> | <b>2,37</b> | <b>1,78</b> | <b>0,59</b> | <b>40</b> | <b>67</b> | <b>83</b> | <b>17</b> | <b>64582</b> |
| aUNJ        | <b>0,05</b>  | <b>1,81</b> | <b>1,33</b> | <b>0,44</b> | <b>51</b> | <b>79</b> | <b>91</b> | <b>9</b>  | <b>68211</b> |

Таблица 4

Оценки прогнозов приземной температуры (°C) на 12 ч по территории ЦФО  
за период май–сентябрь 2015–2016 гг.

| Модель      | BIAS        | RMS         | ABS         | OTNO        | %≤1       | %≤2       | %≤3       | %>3       | N            |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| UKMO        | −0,66       | 1,77        | 1,38        | 0,16        | 45        | 78        | 93        | 7         | 54371        |
| NCEP        | −0,26       | 1,76        | 1,33        | 0,15        | 50        | 79        | 93        | 7         | 54371        |
| DWD         | 0,29        | 1,77        | 1,29        | 0,15        | 53        | 81        | 92        | 8         | 54552        |
| JAPA        | −0,47       | 1,99        | 1,57        | 0,18        | 41        | 71        | 88        | 12        | 53822        |
| T339        | −1,57       | 2,91        | 2,39        | 0,28        | 25        | 48        | 69        | 31        | 51372        |
| PLAV        | 0,97        | 2,30        | 1,77        | 0,20        | 38        | 66        | 84        | 16        | 54552        |
| PLAV20      | −1,87       | 2,97        | 2,49        | 0,29        | 22        | 43        | 65        | 35        | 54552        |
| Regi        | 0,90        | 2,54        | 1,79        | 0,59        | 44        | 69        | 82        | 18        | 54552        |
| WRF-Ryb     | −0,14       | 1,91        | 1,46        | 0,17        | 44        | 76        | 91        | 9         | 47377        |
| WRF-Ber     | −0,66       | 1,97        | 1,58        | 0,18        | 38        | 71        | 90        | 10        | 47704        |
| COSMO-Ru13  | −0,81       | 2,02        | 1,57        | 0,18        | 42        | 71        | 87        | 13        | 53540        |
| COSMO-Ru7   | −0,44       | 1,97        | 1,50        | 0,17        | 45        | 74        | 89        | 11        | 54208        |
| COSMO-Ru2,2 | <b>1,10</b> | <b>2,48</b> | <b>1,86</b> | <b>0,21</b> | <b>38</b> | <b>66</b> | <b>83</b> | <b>17</b> | <b>52476</b> |
| aUNJ        | <b>0,02</b> | <b>1,55</b> | <b>1,14</b> | <b>0,13</b> | <b>57</b> | <b>85</b> | <b>95</b> | <b>5</b>  | <b>54106</b> |

Таблица 5

**Оценки прогнозов приземной температуры (°C) на 24 ч по территории ЦФО  
за период май–сентябрь 2015–2016 гг.**

| Модель      | BIAS        | RMS         | ABS         | OTNO        | %≤1       | %≤2       | %≤3       | %>3       | N            |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| UKMO        | 1,08        | 2,00        | 1,52        | 0,58        | 45        | 72        | 88        | 12        | 54225        |
| NCEP        | −0,24       | 1,92        | 1,48        | 0,57        | 45        | 74        | 89        | 11        | 54225        |
| DWD         | 1,75        | 2,61        | 2,05        | 0,78        | 33        | 58        | 76        | 24        | 54401        |
| JAPA        | 0,56        | 1,88        | 1,46        | 0,55        | 45        | 74        | 89        | 11        | 53676        |
| T339        | 0,57        | 2,22        | 1,76        | 0,68        | 37        | 65        | 83        | 17        | 51234        |
| PLAV        | 1,18        | 2,78        | 2,09        | 0,80        | 35        | 61        | 77        | 23        | 54401        |
| PLAV20      | 1,48        | 3,13        | 2,35        | 0,90        | 32        | 56        | 72        | 28        | 54401        |
| Regi        | 1,00        | 2,22        | 1,70        | 0,65        | 40        | 67        | 84        | 16        | 54401        |
| WRF-Ryb     | 0,04        | 1,87        | 1,46        | 0,57        | 45        | 74        | 89        | 11        | 47069        |
| WRF-Ber     | −0,08       | 1,97        | 1,55        | 0,58        | 42        | 71        | 88        | 12        | 46694        |
| COSMO-Ru13  | 1,54        | 2,53        | 1,95        | 0,75        | 36        | 61        | 79        | 21        | 53221        |
| COSMO-Ru7   | 1,25        | 2,34        | 1,80        | 0,69        | 39        | 66        | 82        | 18        | 54060        |
| COSMO-Ru2,2 | <b>2,05</b> | <b>3,02</b> | <b>2,40</b> | <b>0,92</b> | <b>28</b> | <b>51</b> | <b>69</b> | <b>31</b> | <b>52330</b> |
| aUNJ        | <b>0,03</b> | <b>1,52</b> | <b>1,19</b> | <b>0,45</b> | <b>53</b> | <b>83</b> | <b>95</b> | <b>5</b>  | <b>53934</b> |

Испытания показали (см. табл. 2–5), что прогнозы приземной температуры воздуха по модели COSMO-Ru 2,2 км уступают по качеству прогнозам глобальных иностранных моделей, а также модели COSMO-Ru 7 км и другим мезомоделям, хотя в 2016 г. было некоторое улучшение оценок.

Для оценки прогнозов сильных осадков необходимо построить таблицу сопряженности и вычислить характеристики точности прогнозов [5].

Таблица сопряженности

| Прогноз      | Наблюдалось |             | Сумма      |
|--------------|-------------|-------------|------------|
|              | с явлением  | без явления |            |
| с явлением   | N11         | N12         | N10        |
| без явления  | N21         | N22         | N20        |
| <b>Сумма</b> | <b>N01</b>  | <b>N02</b>  | <b>N00</b> |

В таблице использованы следующие обозначения:

N11 – явление прогнозировалось и наблюдалось;

N12 – явление прогнозировалось, но не наблюдалось («ложные тревоги»);

$N10 = N11 + N12$  – число случаев с прогнозом явления;

N21 – прогнозировалось отсутствие явления, но оно наблюдалось («пропуск цели»);

N22 – прогнозировалось отсутствие явления и его не наблюдалось;

$N20 = N21 + N22$  – число случаев с прогнозом отсутствия явления;

$N01 = N11 + N21$  – число случаев с явлением;

$N02 = N12 + N22$  – число случаев с отсутствием явления;

N00 – общее число случаев.

Показатели успешности прогноза осадков:

– оправдываемость редкого явления:  $U = N11 / (N21 + N10)$ ;

– предупрежденность явления:  $Pred = N11 / N01$ ;

– критерий Пирси–Обухова:  $PIR = N11 / N01 - N12 / N02$ ;

– коэффициент «ложных тревог»:  $kLT = N12 / N01$ ;

– критерий ETS:  $ETS = (N11 - ar) / (N11 - ar + N12 + N21)$ , где  $ar = ((N11 + N12) \cdot (N11 + N21)) / N00$ ;

– критерий Н.А. Багрова–Хайдке (для редких явлений):  $BX = (v - v0) / (1 - v0)$ , где  $v = (N11 + N22) / N00$ ,  $v0 = (m1 + m2) / N00$ ,  $m1 = (N10 \times N02) / N00$ ,  $m2 = (N20 \times N02) / N00$ .

В табл. 6 и 7 представлены оценки прогнозов 12-часовых сумм осадков на 18 ч вперед, т. е. на текущий день (в 18 ч ВСВ делается измерение количества осадков, выпавших за 12 ч на станциях территории оценки).

Обозначения в таблицах:  $Un (\%)$  – оправдываемость количества осадков, рассчитанная по Наставлению [4], где учитывается и факт выпадения осадков, и их количество по грубым градациям, которые, в свою очередь, зависят от фазы осадков. Фаза осадков определялась по температуре в срок наблюдения (выше  $-1^\circ\text{C}$  – дождь или смешанные осадки, ниже  $-1^\circ\text{C}$  – снег). Критерии ETS и PIR относятся только к прогнозу факта осадков. Чем величина критерия больше, тем выше качество прогнозов; BIAS и ABS – арифметическая и абсолютная ошибки количества осадков в мм/12ч; GORD – некая безразмерная, эмпирически подобранная величина, предложенная В.А. Гординым для оценки осадков. Она включает оценку факта и количества осадков и оказалась достаточно репрезентативной.

Пусть  $x$  — фактическое количество выпавших осадков, измеренных на станции (в мм), а  $y$  — прогностическое количество для той же станции. Тогда:

$$GORD(x, y) = \frac{(x - y)^2}{(x + y)^{3/2}} (1 \text{ мм})^{-1/2}$$

Чем меньше значение критерия GORD, тем лучше прогноз.

Как видно из табл. 6 и 7, успешность прогнозов осадков в холодный сезон несколько выше, чем в теплый. Прогнозы осадков модели COSMO-Ru 2.2 км оказались несколько лучше или той же успешности, что и прогнозы глобальных моделей, и прогнозы COSMO-Ru 7 км.

При оценке прогноза сильных осадков прогноз считается оправдавшимся, если фактическое и прогностическое количество осадков  $\geq 6$  мм/12ч (снег) или  $\geq 15$  мм/12ч (дождь и смешанные осадки) соответствует этим критериям. Для очень сильных осадков ( $\geq 20$  мм/12ч для снега или  $\geq 50$  мм/12ч для дождя и смешанных осадков) прогноз оправдывается, если прогнозировалось  $\geq 20$  мм/12ч или  $\geq 50$  мм/12ч, а фактически наблюдалось 16 мм/12ч и 40 мм/12ч (т. е. с учетом допуска) соответственно [4].

Таблица 6

**Оценки прогнозов осадков на 18 ч ВСВ (мм/12ч) по территории ЦФО  
за период октябрь–апрель 2014–2016 гг.**

| Модель      | Un        | ETS         | PIR         | BIAS         | ABS         | GORD         | N            |
|-------------|-----------|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| UKMO        | 82        | 0,35        | 0,54        | 0,27         | 0,58        | 0,263        | 60915        |
| NCEP        | 80        | 0,28        | 0,45        | 0,25         | 0,61        | 0,302        | 60445        |
| DWD         | 82        | 0,33        | 0,51        | 0,11         | 0,54        | 0,256        | 60311        |
| JAPA        | 84        | 0,42        | 0,60        | 0,20         | 0,57        | 0,258        | 60827        |
| T339        | 82        | 0,34        | 0,50        | 0,40         | 0,86        | 0,300        | 47922        |
| PLAV        | 84        | 0,36        | 0,53        | −0,09        | 0,48        | 0,226        | 61014        |
| PLAV20      | 79        | 0,24        | 0,40        | −0,02        | 0,61        | 0,323        | 60386        |
| Regi        | 81        | 0,27        | 0,42        | 0,03         | 0,63        | 0,290        | 60994        |
| WRF-Ryb     | 85        | 0,42        | 0,59        | 0,13         | 0,56        | 0,233        | 43174        |
| WRF-Ber     | 79        | 0,30        | 0,47        | 0,86         | 1,14        | 0,372        | 42634        |
| COSMO-Ru13  | 84        | 0,39        | 0,57        | 0,07         | 0,53        | 0,230        | 57726        |
| COSMO-Ru7   | 84        | 0,38        | 0,56        | 0,06         | 0,52        | 0,234        | 60513        |
| COSMO-Ru2,2 | <b>84</b> | <b>0,39</b> | <b>0,57</b> | <b>0,05</b>  | <b>0,57</b> | <b>0,243</b> | <b>57476</b> |
| aUNJ        | <b>87</b> | <b>0,45</b> | <b>0,62</b> | <b>−0,08</b> | <b>0,43</b> | <b>0,183</b> | <b>61298</b> |

Таблица 7

**Оценки прогнозов осадков на 18 ч ВСВ (мм/12ч) по территории ЦФО  
за период май–сентябрь 2015–2016 гг.**

| <b>Модель</b> | <b>Un</b> | <b>ETS</b>  | <b>PIR</b>  | <b>BIAS</b>  | <b>ABS</b>  | <b>GORD</b>  | <b>N</b>     |
|---------------|-----------|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| UKMO          | 76        | 0,30        | 0,55        | 0,77         | 1,61        | 0,521        | 47373        |
| NCEP          | 74        | 0,24        | 0,47        | 0,38         | 1,45        | 0,531        | 47329        |
| DWD           | 78        | 0,30        | 0,53        | 0,17         | 1,31        | 0,443        | 47373        |
| JAPA          | 78        | 0,35        | 0,57        | 0,43         | 1,44        | 0,474        | 46703        |
| T339          | 82        | 0,34        | 0,50        | 0,06         | 1,47        | 0,421        | 44500        |
| PLAV          | 81        | 0,36        | 0,56        | −0,26        | 1,16        | 0,400        | 47329        |
| PLAV20        | 80        | 0,33        | 0,54        | −0,14        | 1,21        | 0,418        | 47329        |
| Regi          | 82        | 0,24        | 0,34        | −0,73        | 1,14        | 0,404        | 47016        |
| WRF-Ryb       | 77        | 0,32        | 0,55        | 0,49         | 1,49        | 0,495        | 41005        |
| WRF-Ber       | 78        | 0,35        | 0,59        | 0,60         | 1,56        | 0,490        | 41277        |
| COSMO-Ru13    | 82        | 0,37        | 0,56        | −0,04        | 1,28        | 0,398        | 46278        |
| COSMO-Ru7     | <b>83</b> | <b>0,37</b> | <b>0,56</b> | <b>−0,21</b> | <b>1,18</b> | <b>0,377</b> | <b>47025</b> |
| COSMO-Ru2,2   | <b>82</b> | <b>0,33</b> | <b>0,47</b> | <b>−0,18</b> | <b>1,35</b> | <b>0,409</b> | <b>45410</b> |
| <b>aUNJ</b>   | <b>83</b> | <b>0,44</b> | <b>0,63</b> | <b>0,18</b>  | <b>1,26</b> | <b>0,368</b> | <b>47329</b> |

Соответствующие матрицы и оценки для холодного полугодия представлены в табл. 8 и 9.

Отметим, что за эти два сезона некоторая небольшая часть сильных осадков выпадала в виде дождя и смешанных осадков, и это учитывалось в оценке; очень сильных дождевых осадков в эти сезоны на этой территории не наблюдалось.

Из матриц сопряженности видно, что сильные осадки – довольно редкое явление, и они наблюдались менее, чем в 1,5 % случаев; очень сильный снег на рассматриваемой территории – сверхредкое явление для этой выборки и наблюдался лишь в 0,05 % всех случаев. В оценке сильных и очень сильных осадков представлена модель UKMO, которая показала лучшие результаты, и две модели COSMO-Ru. Остальные модели оказались хуже и не представлены из-за экономии места в статье.

Прогнозы осадков для моделей COSMO-Ru 7 км и COSMO-Ru 2,2 км оценивались дополнительно с использованием следующей предварительной процедуры: взята некоторая окрестность вокруг каждой станции в  $0,2^\circ$  ( $\sim 22$  км), и из этой окрестности выбирался узел модели с максимальным количеством осадков, затем сравнивали со значением на станции (варианты А в табл. 8, 9 и далее). В этом случае заметно возрастает число «ложных тревог», но увеличивается и предупреденность явления. Как видно из табл. 8 и 9, модели COSMO-Ru в холодный сезон показали вполне удовлетворительную оправдываемость сильных и даже очень сильных осадков. Напомним, впрочем, что в этот сезон выпадают главным образом обложные осадки, для которых характерна обширная территория выпадения и гораздо большая равномерность, чем для ливневых конвективных осадков.

Таблица 8

**Оценки прогноза сильных осадков на 18 ч BCB (факт и прогноз  $R \geq 6$  мм/12ч в случаях выпадения снега или  $R \geq 15$  мм/12ч в случаях выпадения дождя) по территории ЦФО в период январь—апрель 2015г., октябрь 2015 — апрель 2016 г.**

| Модель                            | Матрица сопряженности |       |       | U  | Pred | kLT | BX   | ETS  |
|-----------------------------------|-----------------------|-------|-------|----|------|-----|------|------|
| UKMO                              | 313                   | 209   | 522   | 38 | 53   | 0,4 | 0,55 | 0,38 |
|                                   | 283                   | 48714 | 48997 |    |      |     |      |      |
|                                   | 596                   | 48923 | 49519 |    |      |     |      |      |
| COSMO-Ru7                         | 303                   | 250   | 553   | 36 | 51   | 0,4 | 0,50 | 0,34 |
|                                   | 289                   | 48166 | 48455 |    |      |     |      |      |
|                                   | 592                   | 48416 | 49008 |    |      |     |      |      |
| COSMO-Ru7<br>(А, окрест. 22 км)   | 387                   | 498   | 885   | 35 | 64   | 0,8 | 0,50 | 0,34 |
|                                   | 213                   | 48885 | 49098 |    |      |     |      |      |
|                                   | 600                   | 49383 | 49983 |    |      |     |      |      |
| COSMO-Ru2,2                       | 287                   | 312   | 599   | 32 | 49   | 0,5 | 0,46 | 0,30 |
|                                   | 294                   | 46255 | 46549 |    |      |     |      |      |
|                                   | 581                   | 46567 | 47148 |    |      |     |      |      |
| COSMO-Ru2,2<br>(А, окрест. 22 км) | 394                   | 818   | 1212  | 28 | 68   | 1,4 | 0,42 | 0,27 |
|                                   | 187                   | 45749 | 45936 |    |      |     |      |      |
|                                   | 581                   | 46567 | 47148 |    |      |     |      |      |

Таблица 9

**Оценки прогноза очень сильных осадков на 18 ч ВСВ  
(факт и прогноз  $R \geq 20$  мм/12ч в случаях выпадения снега,  
с учетом допуска [4] факт  $R \geq 16$  мм/12ч) по территории ЦФО  
в период январь—апрель 2015 г., октябрь 2015 — апрель 2016 г.**

| Модель                            | Матрица сопряженности |    |    | U  | Pred | kLT |
|-----------------------------------|-----------------------|----|----|----|------|-----|
| UKMO                              | 3                     | 3  | 6  | 10 | 12   | 0,1 |
|                                   | 22                    |    |    |    |      |     |
|                                   | 25                    |    |    |    |      |     |
| COSMO-Ru7                         | 8                     | 10 | 18 | 23 | 32   | 0,4 |
|                                   | 17                    |    |    |    |      |     |
|                                   | 25                    |    |    |    |      |     |
| COSMO-Ru7<br>(А, окрест. 22 км)   | 14                    | 22 | 36 | 30 | 56   | 0,9 |
|                                   | 11                    |    |    |    |      |     |
|                                   | 25                    |    |    |    |      |     |
| COSMO-Ru2,2                       | 7                     | 6  | 13 | 23 | 28   | 0,2 |
|                                   | 18                    |    |    |    |      |     |
|                                   | 25                    |    |    |    |      |     |
| COSMO-Ru2,2<br>(А, окрест. 22 км) | 12                    | 27 | 39 | 23 | 48   | 1,1 |
|                                   | 13                    |    |    |    |      |     |
|                                   | 25                    |    |    |    |      |     |

В табл. 10 представлены матрицы и оценки прогнозов сильных осадков для теплого полугодия. Кроме моделей COSMO-Ru здесь также представлена только английская модель UKMO, которая показала лучшие оценки. Результаты оценок таких осадков у всех моделей оказались гораздо скромнее, и их только с некоторой натяжкой можно признать удовлетворительными. Важные для практики очень сильные летние осадки (с учетом допуска  $\geq 40$  мм/12ч, их в выборке за два сезона оказалось 45, т. е. всего  $\sim 0,1$  % всех случаев) ни одна модель (из 13) практически не предсказала, и соответствующая таблица не приводится. К сожалению, такие же результаты для очень сильных осадков были и в сезоны 2012–2013 гг.[1].

Отметим, что прогнозы сильных осадков по модели COSMO-Ru 2,2 км по полученным оценкам несколько уступают прогнозам COSMO-Ru 7 км (табл. 8–10).

Таблица 10

**Оценки прогноза сильных осадков на 18 ч ВСВ ( $R \geq 15$  мм/12, дождь)  
по территории ЦФО май – сентябрь 2015–2016 гг.**

| Модель                            | Матрица сопряженности |       |       | U  | Pred | kLT | BX   | ETS  |
|-----------------------------------|-----------------------|-------|-------|----|------|-----|------|------|
| UKMO                              | 262                   | 671   | 933   | 18 | 34   | 0,9 | 0,30 | 0,17 |
|                                   | 502                   | 45938 | 46440 |    |      |     |      |      |
|                                   | 764                   | 46609 | 47373 |    |      |     |      |      |
| COSMO-Ru7                         | 137                   | 324   | 461   | 13 | 18   | 0,4 | 0,21 | 0,12 |
|                                   | 625                   | 45939 | 46564 |    |      |     |      |      |
|                                   | 762                   | 46263 | 47025 |    |      |     |      |      |
| COSMO-Ru7<br>(А, окрест. 22 км)   | 282                   | 1030  | 1312  | 16 | 37   | 1,4 | 0,26 | 0,15 |
|                                   | 480                   | 45553 | 46034 |    |      |     |      |      |
|                                   | 762                   | 46584 | 47346 |    |      |     |      |      |
| COSMO-Ru2,2                       | 106                   | 569   | 675   | 8  | 15   | 0,8 | 0,14 | 0,07 |
|                                   | 614                   | 44121 | 44735 |    |      |     |      |      |
|                                   | 720                   | 44690 | 45410 |    |      |     |      |      |
| COSMO-Ru2,2<br>(А, окрест. 22 км) | 357                   | 3371  | 3728  | 8  | 50   | 4,7 | 0,14 | 0,08 |
|                                   | 358                   | 41015 | 41373 |    |      |     |      |      |
|                                   | 715                   | 44386 | 45101 |    |      |     |      |      |

Проводилась оценка прогнозов приземного, так называемого «среднего» ветра, т. е. ветра, измеряемого на станциях анемометром с осреднением 10 мин. Однако анемометр измеряет и порывы ветра как в срок наблюдения, так и между сроками. Оценка прогноза «среднего» ветра численных моделей имеет небольшой практический интерес, так как синоптики дают прогноз ветра в очень грубых градациях и практически любой численный прогноз будет точнее синоптического. Поэтому эти оценки здесь не приводятся. Осредненные векторные ошибки полей приземного ветра всех версий модели COSMO-Ru оказались несколько меньше, чем по английской и американской глобальным моделям, но несколько больше, чем по японской (порядок величин всех этих ошибок  $\sim 2$  м/с).

Однако прогноз сильных порывов ветра (шквалов в летний период) представляет несомненный практический интерес, т. к. они могут нанести значительный ущерб различным отраслям экономики. В холодный сезон сильные порывы ветра наблюдаются, как правило, на фоне сильного «среднего» ветра на обширной территории и обусловлены большими барическими градиентами и турбулентностью в пограничном слое атмосферы. Сильные порывы ветра в летний период вызваны главным образом конвекцией (шквалы) и обычно имеют очень локальный характер.

Для оценки порывов ветра вся область оценки была разбита на отдельные «квадратики» со стороной  $1^\circ$  по широте и долготе (т. е. область оценки прогнозов состоит из  $13 \times 9 = 117$  «квадратиков»). В каждом таком «квадратике» выбиралось максимальное значение порыва ветра из прогностического поля в период с 12 до 18 ч ВСВ; затем также выбиралось максимальное значение порыва ветра на всех станциях за этот же период времени, попавших в «квадратик», и проводилось сравнение. Обычно в оценке участвовало 103–104 «квадратика» с данными о порывах ветра.

В табл. 11 приведены матрицы и оценки прогнозов порывов ветра моделей COSMO-Ru 7 км и COSMO-Ru 2,2 км за холодный период 2015–2016 гг. для скоростей ветра  $\geq 18$  м/с и  $\geq 22$  м/с. По нашему мнению, представленные оценки вполне удовлетворительные, однако при лучшей предсказуемости явления прогнозы по модели COSMO-Ru 2,2 км имеют заметно больше «ложных тревог», чем COSMO-Ru 7 км.

В летний период кроме зафиксированных на станциях порывов ветра были дополнительно включены и данные так называемых «донесений», т. е. данные о шквалах, нанесших заметный ущерб и не отмеченных станциями. Местоположение таких шквалов и скорость ветра в них в этих случаях определялась довольно приблизительно. Они составляли  $\sim 10\%$  всех случаев шквалов. В летний период в оценку шквалов были включены и физико-статистические прогнозы по методам А.А. Алексеевой, Е.В. Васильева и Э.В. Переходцевой [3], рассчитываемые с шагом сетки 75 км. Эти результаты представлены в табл. 12 и 13. Из анализа этих таблиц можно сделать вывод, что все эти методы прогнозируют летние порывы ветра, включая шквалы, согласно имеющимся фактическим данным, малоудовлетворительно.

Таблица 11

Оценки прогноза порывов ветра по площадям  $1^\circ \times 1^\circ$  на 12 ч по территории ЦФО  
в период январь – апрель 2015 г., октябрь 2015 – апрель 2016 г.

| Модель          | Матрица сопряженности |       |       | U  | Pred | kLT  | BX   | ETS  |
|-----------------|-----------------------|-------|-------|----|------|------|------|------|
| Порывы V≥18 м/с |                       |       |       |    |      |      |      |      |
| COSMO-Ru7       | 356                   | 1063  | 1419  | 23 | 72   | 2,2  | 0,36 | 0,21 |
|                 | 135                   | 32846 | 32951 |    |      |      |      |      |
|                 | 491                   | 33909 | 34400 |    |      |      |      |      |
| COSMO-Ru2,2     | 437                   | 2794  | 3231  | 13 | 88   | 5,6  | 0,21 | 0,12 |
|                 | 58                    | 30901 | 30959 |    |      |      |      |      |
|                 | 495                   | 33695 | 34190 |    |      |      |      |      |
| Порывы V≥22 м/с |                       |       |       |    |      |      |      |      |
| COSMO-Ru7       | 29                    | 169   | 198   | 13 | 63   | 3,7  | 0,25 | 0,13 |
|                 | 17                    | 34185 | 34202 |    |      |      |      |      |
|                 | 46                    | 34354 | 34400 |    |      |      |      |      |
| COSMO-Ru2,2     | 35                    | 564   | 599   | 6  | 74   | 12,0 | 0,16 | 0,09 |
|                 | 12                    | 33579 | 33591 |    |      |      |      |      |
|                 | 47                    | 34143 | 34190 |    |      |      |      |      |

Таблица 12

Оценки прогноза порывов ветра  $V \geq 18$  м/с по площадям  $1^\circ \times 1^\circ$  на 12 ч  
по территории ЦФО в период 16 мая – 15 сентября 2015–2016 гг.

| Модель                            | Матрица сопряженности |       |       | U | Pred | kLT | BX   | ETS  |
|-----------------------------------|-----------------------|-------|-------|---|------|-----|------|------|
| Е.В. Васильев<br>(crit $\geq 3$ ) | 20                    | 634   | 654   | 2 | 7    | 2,3 | 0,02 | 0,01 |
|                                   | 258                   | 24633 | 24891 |   |      |     |      |      |
|                                   | 278                   | 25267 | 25545 |   |      |     |      |      |
| COSMO-Ru7                         | 115                   | 1168  | 1283  | 7 | 41   | 4,1 | 0,14 | 0,08 |
|                                   | 172                   | 24562 | 24737 |   |      |     |      |      |
|                                   | 279                   | 25371 | 25650 |   |      |     |      |      |
| COSMO-Ru2,2                       | 152                   | 2366  | 3518  | 4 | 62   | 9,6 | 0,07 | 0,04 |
|                                   | 92                    | 21625 | 21717 |   |      |     |      |      |
|                                   | 244                   | 24991 | 25235 |   |      |     |      |      |

Таблица 13

**Оценки прогноза порывов ветра  $V \geq 22$  м/с, включая шквалы, по площадям  $1^\circ \times 1^\circ$  на 12 ч по территории ЦФО в период 16 мая – 15 сентября 2015–2016 гг.**

| Модель                                | Матрица сопряженности |       |       | U | Pred | kLT  | BX   | ETS  |
|---------------------------------------|-----------------------|-------|-------|---|------|------|------|------|
| А.А. Алексеева<br>(crit $\geq 1$ )    | 29                    | 2872  | 2901  | 1 | 57   | 56,3 | 0,01 | 0,01 |
|                                       | 22                    | 22622 | 22644 |   |      |      |      |      |
|                                       | 51                    | 25494 | 25545 |   |      |      |      |      |
| Е.В. Васильев<br>(crit $\geq 5$ )     | 5                     | 649   | 654   | 1 | 9    | 12,7 | 0,01 | 0,01 |
|                                       | 46                    | 24845 | 24891 |   |      |      |      |      |
|                                       | 51                    | 25494 | 25545 |   |      |      |      |      |
| Э.В. Переходцева<br>(crit $\geq 60$ ) | 25                    | 3927  | 3952  | 1 | 49   | 77,0 | 0,01 | 0    |
|                                       | 26                    | 21777 | 21803 |   |      |      |      |      |
|                                       | 51                    | 25494 | 25545 |   |      |      |      |      |
| COSMO-Ru7                             | 0                     | 45    | 45    | 0 | 0    | 0.9  | 0    | 0    |
|                                       | 51                    | 25554 | 25605 |   |      |      |      |      |
|                                       | 51                    | 25599 | 25650 |   |      |      |      |      |
| COSMO-Ru2,2                           | 16                    | 1351  | 1367  | 1 | 34   | 28,7 | 0,02 | 0,01 |
|                                       | 31                    | 23837 | 23868 |   |      |      |      |      |
|                                       | 47                    | 25188 | 25235 |   |      |      |      |      |

Отметим, что проблема определения местоположения шквалов и силы ветра в них еще далека от разрешения (может быть, в этом вопросе помогут данные ДМРЛ-С после получения результатов их валидации). Это серьезно затрудняет адекватную оценку этого явления.

### 3. Успешность прогнозирования по территории Северного Кавказа

Вариант модели COSMO-Ru 2,2 км для Северного Кавказа оценивался по области  $42\text{--}45^\circ$  с. ш. и  $37\text{--}45^\circ$  в. д. Для оценки использовались данные ~53 синоптических станций, расположенных на этой территории.

В холодный период прогнозы приземной температуры воздуха на 12 и 24 ч по модели COSMO-Ru 2,2 км оказались лучшими среди всех других моделей. В теплый период это же можно сказать о прогнозах на 12 ч, прогнозы на 24 ч незначительно уступают прогнозам ряда моделей (табл. 14–17).

Таблица 14

Оценки прогнозов приземной температуры (°C) на 12 ч  
по территории Северного Кавказа за период октябрь – апрель 2014–2016 гг.

| Модель       | BIAS         | RMS         | ABS         | OTNO        | %≤1       | %≤2       | %≤3       | %>3       | N            |
|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| UKMO         | –1,75        | 4,02        | 3,02        | 0,49        | 24        | 45        | 63        | 37        | 22418        |
| NCEP         | –1,33        | 3,50        | 2,64        | 0,42        | 29        | 50        | 66        | 34        | 22329        |
| DWD          | –1,36        | 3,47        | 2,55        | 0,41        | 30        | 54        | 70        | 30        | 22234        |
| JAPA         | –2,63        | 4,42        | 3,57        | 0,58        | 18        | 34        | 49        | 51        | 22392        |
| T339         | –4,80        | 6,70        | 5,40        | 0,86        | 12        | 23        | 33        | 67        | 17518        |
| PLAV         | –1,86        | 4,24        | 3,32        | 0,54        | 21        | 40        | 55        | 45        | 22347        |
| PLAV20       | –1,71        | 4,64        | 3,58        | 0,58        | 19        | 37        | 52        | 48        | 22180        |
| Regi         | –1,82        | 4,84        | 3,78        | 0,61        | 18        | 35        | 50        | 50        | 22392        |
| WRF-Ryb      | –1,56        | 3,78        | 2,81        | 0,45        | 27        | 49        | 66        | 34        | 15011        |
| WRF-Ber      | –1,26        | 3,92        | 2,90        | 0,48        | 26        | 48        | 65        | 35        | 14574        |
| COSMO-Ru13   | –1,74        | 3,72        | 2,73        | 0,44        | 28        | 51        | 67        | 33        | 21424        |
| COSMO-Ru7    | –1,42        | 3,48        | 2,54        | 0,41        | 31        | 55        | 70        | 30        | 22280        |
| COSMO-Ru2,2Y | <b>–0,88</b> | <b>2,92</b> | <b>2,19</b> | <b>0,34</b> | <b>33</b> | <b>58</b> | <b>75</b> | <b>25</b> | <b>20406</b> |
| aUNJ         | <b>–0,02</b> | <b>2,24</b> | <b>1,73</b> | <b>0,28</b> | <b>39</b> | <b>66</b> | <b>84</b> | <b>16</b> | <b>22440</b> |

Таблица 15

Оценки прогнозов приземной температуры (°C) на 24 ч  
по территории Северного Кавказа за период октябрь–апрель 2014–2016 гг.

| Модель       | BIAS        | RMS         | ABS         | OTNO        | %≤1       | %≤2       | %≤3       | %>3       | N            |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| UKMO         | –0,58       | 3,45        | 2,51        | 0,88        | 31        | 54        | 71        | 29        | 22349        |
| NCEP         | –0,71       | 3,27        | 2,42        | 0,85        | 31        | 55        | 71        | 29        | 22265        |
| DWD          | –0,06       | 2,86        | 2,15        | 0,75        | 34        | 59        | 75        | 25        | 22138        |
| JAPA         | –1,31       | 3,40        | 2,69        | 0,94        | 24        | 46        | 64        | 36        | 22326        |
| T339         | –4,16       | 6,00        | 4,72        | 1,64        | 14        | 27        | 39        | 61        | 17399        |
| PLAV         | –0,36       | 3,24        | 2,55        | 0,89        | 26        | 49        | 67        | 33        | 22282        |
| PLAV20       | 0,05        | 4,27        | 3,19        | 1,11        | 24        | 44        | 60        | 40        | 22116        |
| Regi         | 0,57        | 4,33        | 3,38        | 1,18        | 21        | 39        | 54        | 46        | 22326        |
| WRF-Ryb      | –0,14       | 3,13        | 2,36        | 0,82        | 30        | 55        | 71        | 29        | 14873        |
| WRF-Ber      | 0,20        | 3,23        | 2,44        | 0,84        | 30        | 53        | 70        | 30        | 14041        |
| COSMO-Ru13   | 0,05        | 3,19        | 2,41        | 0,84        | 31        | 54        | 70        | 30        | 21420        |
| COSMO-Ru7    | 0,21        | 3,03        | 2,27        | 0,79        | 32        | 56        | 73        | 27        | 22216        |
| COSMO-Ru2,2Y | <b>0,84</b> | <b>2,73</b> | <b>2,09</b> | <b>0,73</b> | <b>34</b> | <b>59</b> | <b>76</b> | <b>24</b> | <b>20208</b> |
| aUNJ         | <b>0,04</b> | <b>2,21</b> | <b>1,70</b> | <b>0,60</b> | <b>39</b> | <b>67</b> | <b>85</b> | <b>15</b> | <b>22370</b> |

Таблица 16

Оценки прогнозов приземной температуры (°C) на 12 ч  
по территории Северного Кавказа за период май–сентябрь 2015–2016 гг.

| Модель       | BIAS        | RMS         | ABS         | OTNO        | %≤1       | %≤2       | %≤3       | %>3       | N            |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| UKMO         | –1,68       | 3,93        | 3,02        | 0,36        | 21        | 41        | 61        | 39        | 17578        |
| NCEP         | –1,28       | 3,56        | 2,71        | 0,33        | 26        | 48        | 65        | 35        | 17578        |
| DWD          | –1,37       | 3,58        | 2,59        | 0,31        | 30        | 54        | 69        | 31        | 17584        |
| JAPA         | –2,50       | 4,60        | 3,78        | 0,45        | 14        | 28        | 43        | 57        | 17362        |
| T339         | –4,33       | 6,23        | 5,10        | 0,62        | 11        | 21        | 33        | 67        | 16474        |
| PLAV         | –0,90       | 3,75        | 2,84        | 0,34        | 25        | 46        | 63        | 37        | 17584        |
| PLAV20       | –1,76       | 4,90        | 3,78        | 0,45        | 17        | 33        | 49        | 51        | 17584        |
| Regi         | –1,21       | 5,06        | 3,88        | 0,47        | 18        | 35        | 51        | 49        | 17584        |
| WRF-Ryb      | –1,99       | 3,91        | 2,95        | 0,36        | 23        | 44        | 63        | 37        | 14131        |
| WRF-Ber      | –2,23       | 4,03        | 3,07        | 0,37        | 20        | 41        | 61        | 39        | 13828        |
| COSMO-Ru13   | –1,65       | 3,82        | 2,77        | 0,33        | 28        | 51        | 67        | 33        | 17235        |
| COSMO-Ru7    | –1,28       | 3,61        | 2,56        | 0,31        | 30        | 55        | 71        | 29        | 17471        |
| COSMO-Ru2,2Y | <b>0,48</b> | <b>3,16</b> | <b>2,29</b> | <b>0,27</b> | <b>30</b> | <b>56</b> | <b>74</b> | <b>26</b> | <b>16221</b> |
| aUNJ         | <b>0,02</b> | <b>2,03</b> | <b>1,42</b> | <b>0,17</b> | <b>49</b> | <b>77</b> | <b>91</b> | <b>9</b>  | <b>17541</b> |

Таблица 17

Оценки прогнозов приземной температуры (°C) на 24 ч  
по территории Северного Кавказа за период май–сентябрь 2015–2016 гг.

| Модель       | BIAS        | RMS         | ABS         | OTNO        | %≤1       | %≤2       | %≤3       | %>3       | N            |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| UKMO         | –0,23       | 3,01        | 2,15        | 1,21        | 34        | 59        | 76        | 24        | 17580        |
| NCEP         | –1,90       | 3,43        | 2,60        | 1,46        | 27        | 49        | 66        | 34        | 17580        |
| DWD          | 0,32        | 2,69        | 2,00        | 1,12        | 34        | 60        | 78        | 22        | 17586        |
| JAPA         | –1,19       | 3,15        | 2,46        | 1,39        | 26        | 48        | 67        | 33        | 17364        |
| T339         | –3,16       | 5,07        | 3,90        | 2,18        | 18        | 34        | 48        | 52        | 16477        |
| PLAV         | 0,66        | 3,02        | 2,26        | 1,27        | 31        | 55        | 72        | 28        | 17586        |
| PLAV20       | 0,79        | 4,35        | 3,19        | 1,79        | 25        | 45        | 60        | 40        | 17586        |
| Regi         | 1,30        | 4,71        | 3,70        | 2,07        | 18        | 34        | 49        | 51        | 17586        |
| WRF-Ryb      | –0,65       | 2,73        | 1,95        | 1,13        | 36        | 63        | 80        | 20        | 14086        |
| WRF-Ber      | –0,41       | 2,71        | 1,93        | 1,10        | 36        | 63        | 80        | 20        | 13583        |
| COSMO-Ru13   | 0,04        | 2,96        | 2,21        | 1,24        | 32        | 56        | 74        | 26        | 17183        |
| COSMO-Ru7    | 0,24        | 2,88        | 2,11        | 1,18        | 33        | 58        | 76        | 24        | 17472        |
| COSMO-Ru2,2Y | <b>1,45</b> | <b>3,02</b> | <b>2,28</b> | <b>1,28</b> | <b>30</b> | <b>53</b> | <b>72</b> | <b>28</b> | <b>16231</b> |
| aUNJ         | <b>0,02</b> | <b>1,77</b> | <b>1,22</b> | <b>0,68</b> | <b>53</b> | <b>83</b> | <b>94</b> | <b>6</b>  | <b>17552</b> |

Прогноз осадков на 18 ч для Северного Кавказа по модели COSMO-Ru 2,2 км оказался лучше всех других прогнозов как в холодный, так и в теплый периоды (табл. 18, 19). Оценка прогнозов сильных осадков и порывов ветра для этой территории не проводилась.

Таблица 18

**Оценки прогнозов осадков на 18 ч ВСВ (мм/12ч)  
по территории Северного Кавказа за период октябрь–апрель 2014–2016 гг.**

| Модель      | Un        | ETS         | PIR         | BIAS         | ABS         | GORD         | N            |
|-------------|-----------|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| UKMO        | 76        | 0,28        | 0,53        | 0,58         | 1,61        | 0,477        | 22466        |
| NCEP        | 78        | 0,31        | 0,54        | 0,03         | 1,48        | 0,440        | 22320        |
| DWD         | 79        | 0,31        | 0,55        | 0,12         | 1,40        | 0,419        | 22252        |
| JAPA        | 78        | 0,31        | 0,54        | −0,24        | 1,46        | 0,456        | 22452        |
| T339        | 69        | 0,20        | 0,37        | 3,82         | 5,04        | 0,934        | 17613        |
| PLAV        | 79        | 0,31        | 0,52        | −0,23        | 1,40        | 0,426        | 22522        |
| PLAV20      | 75        | 0,24        | 0,45        | −0,13        | 1,56        | 0,506        | 22294        |
| Regi        | 74        | 0,20        | 0,38        | −0,25        | 1,79        | 0,569        | 22510        |
| WRF-Ryb     | 81        | 0,36        | 0,56        | −0,18        | 1,41        | 0,396        | 14823        |
| WRF-Ber     | 78        | 0,33        | 0,54        | 0,78         | 2,10        | 0,504        | 14015        |
| COSMO-Ru13  | 82        | 0,38        | 0,59        | 0,06         | 1,37        | 0,373        | 21304        |
| COSMO-Ru7   | <b>83</b> | <b>0,40</b> | <b>0,60</b> | <b>−0,05</b> | <b>1,32</b> | <b>0,352</b> | <b>22339</b> |
| COSMO-Ru2,2 | <b>84</b> | <b>0,40</b> | <b>0,59</b> | <b>−0,16</b> | <b>1,27</b> | <b>0,341</b> | <b>20207</b> |
| aUNJ        | <b>84</b> | <b>0,41</b> | <b>0,62</b> | <b>−0,37</b> | <b>1,14</b> | <b>0,311</b> | <b>22624</b> |

Таблица 19

**Оценки прогнозов осадков на 18 ч ВСВ (мм/12ч)  
по территории Северного Кавказа за период май–сентябрь 2015–2016 гг.**

| Модель | Un | ETS  | PIR  | BIAS  | ABS  | GORD  | N     |
|--------|----|------|------|-------|------|-------|-------|
| UKMO   | 61 | 0,15 | 0,38 | 2,14  | 3,48 | 0,955 | 17572 |
| NCEP   | 64 | 0,17 | 0,39 | 1,47  | 3,23 | 0,912 | 17566 |
| DWD    | 72 | 0,23 | 0,49 | 0,20  | 2,12 | 0,633 | 17572 |
| JAPA   | 61 | 0,13 | 0,34 | 1,02  | 2,87 | 0,932 | 17341 |
| T339   | 69 | 0,19 | 0,35 | 5,78  | 7,76 | 1,173 | 16477 |
| PLAV   | 62 | 0,15 | 0,36 | 0,47  | 2,48 | 0,848 | 17566 |
| PLAV20 | 61 | 0,13 | 0,34 | 0,65  | 2,73 | 0,897 | 17566 |
| Regi   | 78 | 0,21 | 0,35 | −0,96 | 1,90 | 0,544 | 17451 |

Таблица 19 (окончание)

| Модель      | Un        | ETS         | PIR         | BIAS         | ABS         | GORD         | N            |
|-------------|-----------|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| WRF-Ryb     | 65        | 0,19        | 0,42        | 1,04         | 2,95        | 0,855        | 13870        |
| WRF-Ber     | 66        | 0,19        | 0,44        | 1,20         | 2,93        | 0,835        | 13510        |
| COSMO-Ru13  | 73        | 0,24        | 0,47        | 0,44         | 2,41        | 0,655        | 17164        |
| COSMO-Ru7   | 77        | <b>0,28</b> | <b>0,51</b> | <b>0,06</b>  | <b>2,15</b> | <b>0,578</b> | <b>17452</b> |
| COSMO-Ru2,2 | <b>81</b> | <b>0,32</b> | <b>0,46</b> | <b>−0,41</b> | <b>2,13</b> | <b>0,515</b> | <b>15969</b> |
| aUNJ        | <b>72</b> | <b>0,28</b> | <b>0,54</b> | <b>1,13</b>  | <b>2,77</b> | <b>0.701</b> | <b>17566</b> |

#### 4. Решение ЦМКП

ЦМКП Росгидромета в своем решении от 15.12.2016 г. [7] рекомендовала следующее:

- внедрить в оперативную практику по территории Московской области и ЦФО прогнозы осадков и скорости ветра по модели COSMO-Ru 2,2 км как дополняющие и детализирующие основной метод прогноза по модели COSMO-Ru 7 км;

- использовать прогнозы COSMO-Ru 2,2 км (температура, ветер, осадки) по территории Северного Кавказа в оперативной практике в качестве основного численного метода краткосрочного прогноза погоды;

- разработчикам продолжить работу по развитию модели COSMO-Ru 2,2 км с учетом возможностей нового высокопроизводительного вычислительного комплекса.

#### Благодарности

Работа выполнена благодаря неоценимой помощи большого количества сотрудников ФГБУ «Гидрометцентр России», Главного вычислительного центра Росгидромета, СибНИГМИ, кафедры метеорологии и гидрологии географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова и коллегам из консорциума COSMO. Всем им выражаем нашу искреннюю благодарность и признательность.

#### Список литературы

1. *Багров А.Н.* Сравнительная оценка прогнозов сильных летних осадков моделей атмосферы различного масштаба // Информационный сборник № 41. Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2014. – С. 63–73.

2. *Багров А.Н., Быков Ф.Л., Гордин В.А.* Комплексный прогноз приземных метеорологических величин // Метеорология и гидрология. – 2014. – № 5. – С. 5–16.

3. *Переходцева Э.В.* О гидродинамико-статистическом прогнозе до двух суток явлений сильного ветра и сильных осадков на территории Северного Кавказа // Труды Гидрометцентра России. — 2011. — Вып. 347. — С. 113–125.

4. РД 52.27.724-2009. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. — М.; Обнинск: «ИГ—СОЦИН», 2009. — 50 с.

5. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — 150 с.

6. Решение Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета от 13 апреля 2011 г. Раздел «Решения ЦМКП» сайта Методического кабинета Гидрометцентра России. — <http://method.hydromet.ru/>.

7. Решение Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам от 15 декабря 2016 г. Раздел «Решения ЦМКП» сайта Методического кабинета Гидрометцентра России. — <http://method.hydromet.ru/>.

8. *Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М., Алферов Д.Ю., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Казакова Е.В., Кирсанов А.А., Никитин М.А., Перов В.Л., Суркова Г.В., Ревокатова А.П., Шатунова М.В., Чумаков М.М.* Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: второй этап реализации и развития // Метеорология и гидрология. — 2015. — № 6. — С. 58–71.

9. *Ривин Г.С., Розинкина И.А., Багров А.Н., Блинов Д.В.* Мезомасштабная модель COSMO-Ru7 и результаты ее оперативных испытаний // Информационный сборник № 39. Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. — 2012. — С. 15–48.

10. Сайт консорциума COSMO с документацией модели COSMO: <http://cosmo-model.org/content/model/documentation/core/default.htm>.

11. Сайт консорциума COSMO: <http://www.cosmo-model.org>.

12. Сайт Методического кабинета ФГБУ «Гидрометцентр России»: <http://method.meteorf.ru/>.

13. *Baldauf M., Seifert A., Forstner J., Majewski D., Raschendorfer M., Reinhardt T.* Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model: description and sensitivities // Mon. Wea. Rev. — 2011. — Vol. 139. — P. 3887–3905.

14. *Steppeler J., Doms G., Schaettler U., Bitzer H.-W., Gassmann A., Damrath U., Gregoric G.* Meso-gamma scale forecasts using the nonhydrostatic model LM // Meteorol. Atmos. Phys. — 2003. — Vol. 82. — P. 75–96.

15. *Zangl G., Reinert D., Ripodas P., Baldauf M.* The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modeling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core // Q. J. R. Meteorol. Soc. — 2015. — Vol. 14. — P. 563–579.

*Р.М. Вильфанд, Е.Л. Васильева, С.Л. Мищенко,  
В.И. Лукьянов, А.Д. Голубев, П.П. Васильев*

## **МЕТОД ПРОГНОЗА ОПАСНОГО ПРИРОДНОГО ЯВЛЕНИЯ – АНОМАЛЬНО ЖАРКОЙ ПОГОДЫ – НА 48–144 ЧАСА ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕГО ИСПЫТАНИЯ**

В Руководящем документе Росгидромета [1] аномально жаркая погода отнесена к опасным природным явлениям (ОЯ) и определена как сохранение над данной территорией в течение пяти суток и более значений среднесуточной температуры воздуха выше климатической нормы на 7 °С и более. Необходимо отметить, что впервые в прогностической практике гидрометобеспечения речь идет о такой большой заблаговременности прогноза ОЯ, как 48–144 часа.

В ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана, реализована на комплексе ЭВМ и в последние годы используется в оперативной практике прогностическая технология расчета элементов погоды (РЭП) численной интерпретации гидродинамических моделей атмосферы (ГДМА) для среднесрочного прогноза экстремальной температуры воздуха у поверхности земли с детализацией по дням [2]. В некоторый момент времени и в данной точке пространства значение температуры воздуха можно представить в виде суммы климатической нормы и ее аномалии. Исходя из многолетнего опыта обеспечения прогнозами температуры воздуха различных отраслей экономики, в том числе связанных с энергопотреблением, мы видим большую эффективность в использовании прогнозов аномалий температур воздуха наряду с использованием прогнозов абсолютных значений температуры воздуха.

Созданная в ФГБУ «Гидрометцентр России» и изложенная в данной статье технология составления предупреждения об ОЯ –

аномально жаркой погоде в теплое время года реализуется следующим образом. В период с апреля по сентябрь в ФГБУ «Гидрометцентр России» составляется прогноз аномалий средней суточной температуры воздуха и максимальной температуры воздуха днем по субъектам Российской Федерации. При наличии в прогнозе аномалии средней суточной температуры (выше  $7^{\circ}\text{C}$  в течение пяти суток и более [1]) составляется предупреждение для *Правительственной комиссии по обеспечению безопасности энергоснабжения (Федеральный штаб)*. Основой для данного прогноза ОЯ (как уже отмечалось выше) являются прогностические материалы, подготовленные по схеме РЭП [2].

Первый этап составления прогноза опасного природного явления для территории Российской Федерации, включая пересылку результатов прогнозисту (синоптику) для окончательной коррекции, полностью автоматизирован и осуществляется следующим образом. После расчета по прогностической технологии РЭП [2] прогноза температуры воздуха (по оперативным данным) осуществляется численная обработка прогностических метеорологических полей с целью ранжирования районов с высокими положительными аномалиями. Осуществляется автоматическое составление соответствующих текущих каталогов для систематизации полученных значений. Для удобства использования прогнозистами-синоптиками данные визуализируются в виде текстовых таблиц и карт изолиний. Эти материалы пересылаются на ПЭВМ в отдел краткосрочных прогнозов погоды (ОКПП ФГБУ «Гидрометцентр России») для дальнейшей коррекции.

Прогнозист анализирует синоптическую обстановку на территории тех субъектов России, которые по рассчитанным значениям аномалии температуры воздуха входят в критерии потенциально опасных для обеспечения безопасности энергоснабжения. При этом анализируется весь комплекс аэросиноптических материалов, доступных на данный момент времени и с максимальной заблаговременностью. Проводится анализ прошедшей погоды, где основное внимание уделяется значениям максимальной температуры воздуха. При необходимости прогнозист вносит изменения в выходные данные расчетов по схеме РЭП и формирует список субъектов Российской Федерации, на территории которых ожидается аномально жаркая погода.

Работу синоптика по выявлению и прогнозу зон с аномалиями температуры воздуха рассмотрим на примере прогноза экстремально высоких температур.

Используются следующие данные наблюдений и прогнозов:

1. Карта синоптического анализа за 00 ч ВСВ текущих суток.
2. Прогностические карты Н-500 и Р0 по модели Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП) на 24–168 ч.
3. Карты максимальных значений температуры по территории России за предшествующий день и минимальных температур за прошедшую ночь;
4. Прогностические материалы, полученные по схеме РЭП:
  - 4.1. Прогностические карты по территории России ежедневной аномалии температуры воздуха на 48–144 ч (5 карт, рисунок).
  - 4.2. Прогностическая карта по территории России аномалий температуры на пентаду.
  - 4.3. Прогностическая карта по территории России аномалий температуры на декаду с нулевой заглаговременностью.
  - 4.4. Таблица прогноза средней пентадной температуры воздуха и ее аномалии по субъектам Российской Федерации (табл. 1).
  - 4.5. Таблица прогноза экстремально высокой температуры воздуха по пунктам (содержащая соответствующие нормы температуры, индекс станции, значения ожидаемой температуры воздуха и ее аномалии, преобладающей температуры воздуха в данном регионе) по субъектам Российской Федерации (табл. 2).

Последовательность работы синоптика

Проводя анализ фактической синоптической обстановки с использованием карт синоптического анализа, карт фактических значений максимальной и минимальной температуры за ближайшие день и ночь, прогностических карт ЕЦСПП на 24–168 ч (материалы 1, 2, 3), выявляются территории, на которых может установиться жаркая погода. Изучаются синоптические процессы, при которых могут сформироваться высокие антициклоны, блокирующие западно-восточный перенос воздушных масс и благоприятные для продолжительного и чрезмерного прогрева подстилающей поверхности и атмосферы. Далее синоптический анализ подкрепляется анализом расчетных данных по схеме РЭП (материалы 4.1–4.5).



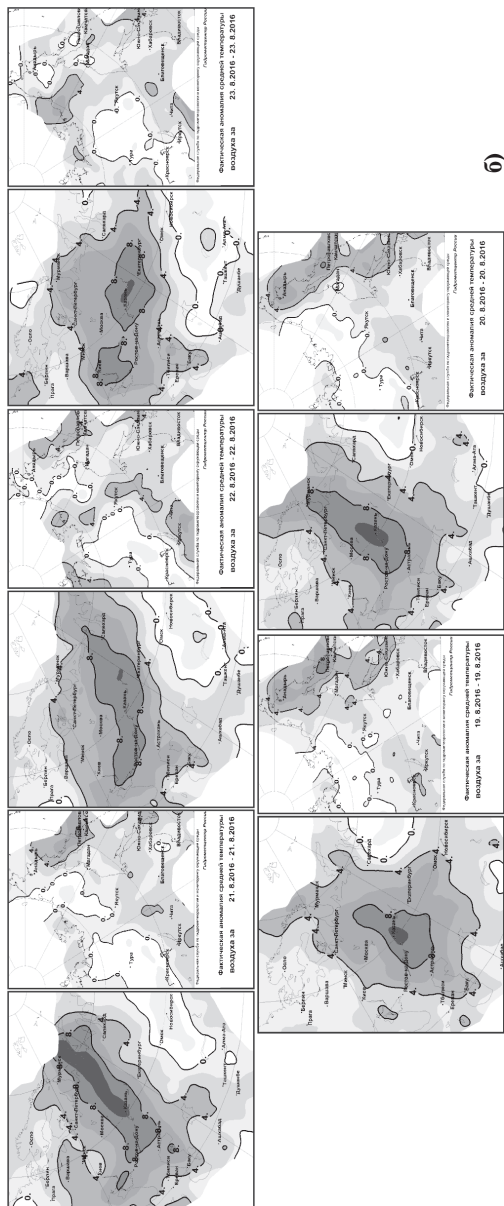


Рис. Ежедневные фактические (а) и прогнозные (б) аномалии среднесуточных температур воздуха по территории Российской Федерации с 19 по 23 августа 2016 г.

Таблица 1

**Прогноз средней температуры воздуха и ее аномалии на пентаду  
19–23 августа 2016 года (данные приведены для административных центров  
субъектов Российской Федерации)**

| <b>№<br/>п/п</b> | <b>Субъект<br/>федерации</b> | <b>Средняя<br/>температура, °С</b> | <b>Аномалия<br/>температуры, °С</b> | <b>Норма, °С</b> |
|------------------|------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------|
| 1                | Архангельская область        | 18...20                            | +6,9                                | 11,8             |
| 2                | Ненецкий А.О.                | 15...17                            | +7,0                                | 9,1              |
| 3                | Мурманская область           | 15...17                            | +5,7                                | 9,8              |
| 4                | Республика Карелия           | 17...19                            | +5,4                                | 12,8             |
| 5                | Вологодская область          | 19...21                            | +6,3                                | 13,3             |
| 6                | Республика Коми              | 19...21                            | +7,7                                | 12,0             |
| 7                | Ленинградская область        | 18...20                            | +4,1                                | 15,1             |
| 8                | Новгородская область         | 18...20                            | +4,4                                | 14,3             |
| 9                | Псковская область            | 17...19                            | +3,9                                | 14,6             |
| 10               | Калининградская<br>область   | 17...19                            | +2,4                                | 15,9             |
| ...              | ...                          |                                    |                                     |                  |
| 83               |                              |                                    |                                     |                  |

Синоптику необходимо решить две задачи.

1. Выявить наличие зон экстремально высоких температур, где прогностические значения (материалы 4.5) максимальных температур выше порога, определенного для данных территорий как критерий ОЯ (сильная жара). При выявлении таких зон разрабатывается штормовое предупреждение.

2. Определить территории (субъекты России), где фактические и ожидаемые значения среднесуточной температуры воздуха в течение пяти суток и более выше климатической нормы на 7 °С и более.

Анализ производится в следующей последовательности:

– по прогностической карте (материалы 4.2) выявляются регионы, где аномалия температуры составляет +4 °С и выше;

– по ежедневным прогностическим картам аномалии температуры воздуха на 48–144 ч (материалы 4.1) по территории России уточняются регионы, где ежесуточные аномалии температуры составляют +6...8 °С и выше. Определяется направление перемещения таких зон и продолжительность периода высоких значений аномалий температуры.

Таблица 2

Прогноз экстремального значения положительной аномалии среднесуточной температуры воздуха  $\Delta T$  (и соответствующей максимальной температуры воздуха днем  $T_{max}$ ) с указанием индекса пункта, в котором оно наблюдалось, и прогноз преобладающей среднесуточной температуры воздуха по территории субъекта РФ на 19–23 августа 2016 года

| №<br>п/п | Субъект<br>федерации     | $\Delta T$ ( $T_{max}$ ), индекс и название пункта<br>преобл. Тер. по территории субъекта РФ |                                                       |                                                     |                                                      |                                                     |
|----------|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
|          |                          | 19.08.2016                                                                                   | 20.08.2016                                            | 21.08.2016                                          | 22.08.2016                                           | 23.08.2016                                          |
| 1        | Архангельская<br>область | <b>7,3</b> (25,8)<br>22768<br>Шенкурск<br>16...21                                            | <b>8,6</b> (24,5)<br>22546<br>Северодвинск<br>17...22 | <b>8,7</b> (23,1)<br>22563<br>Пинега<br>17...22     | <b>6,7</b> (23,2)<br>22798<br>Яренск<br>15...20      | <b>7,1</b> (23,8)<br>22641<br>Онега<br>15...20      |
| 2        | Ненецкий АО              | <b>6,0</b> (17,8)<br>22193<br>Бугрино<br>11...16                                             | <b>8,1</b> (22,6)<br>22292<br>Индига<br>12...17       | <b>9,5</b> (23,2)<br>23205<br>Нарьян-Мар<br>14...19 | <b>8,8</b> (19,7)<br>23219<br>Хоседа-Хард<br>12...17 | <b>6,6</b> (20,1)<br>23205<br>Нарьян-Мар<br>12...17 |
| 64       | Кемеровская<br>область   | <b>3,6</b> (24,4)<br>29645<br>Кемерово I<br>15...20                                          | <b>2,7</b> (21,6)<br>29955<br>Усть-Кабырза<br>12...17 | Положительная<br>аномалия<br>отсутствует<br>9...14  | Положительная<br>аномалия<br>отсутствует<br>9...14   | Положительная<br>аномалия<br>отсутствует<br>9...14  |
| 65       | Алтайский<br>край        | <b>4,4</b> (27,5)<br>29816<br>Хабары<br>17...22                                              | <b>2,9</b> (24,0)<br>36021<br>Ключи<br>15...20        | Положительная<br>аномалия<br>отсутствует<br>12...17 | Положительная<br>аномалия<br>отсутствует<br>11...16  | <b>0,7</b> (22,4)<br>29816<br>Хабары<br>11...16     |

Таблица 2 (окончание)

| №<br>п/п | Субъект<br>федерации | ΔТ (Тmax), индекс и название пункта<br>преобладающей Тср. по территории субъекта РФ |                                                      |                                                     |                                                     |                                                    |
|----------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
|          |                      | 19.08.2016                                                                          | 20.08.2016                                           | 21.08.2016                                          | 22.08.2016                                          | 23.08.2016                                         |
| 66       | Республика<br>Алтай  | 2,9 (24,8)<br>36061<br>Турочак<br>14...19                                           | 3,1 (21,9)<br>36259<br>Кош-Агач<br>14...19           | 1,6 (17,6)<br>36259<br>Кош-Агач<br>11...16          | Положительная<br>аномалия<br>отсутствует<br>9...14  | Положительная<br>аномалия<br>отсутствует<br>8...13 |
| 67       | Красноярский<br>край | 3,5 (22,0)<br>29876<br>Казыр<br>12...17                                             | 3,7 (24,7)<br>36091<br>Нижне-<br>Усинское<br>10...15 | 1,9 (18,6)<br>36091<br>Нижне-<br>Усинское<br>9...14 | 1,5 (17,5)<br>23363<br>Советская<br>Речка<br>8...13 | 1,8 (18,5)<br>23774<br>Келлог<br>8...13            |
|          | ...                  |                                                                                     |                                                      |                                                     |                                                     |                                                    |
| 83       |                      |                                                                                     |                                                      |                                                     |                                                     |                                                    |

Выбираются регионы с продолжительными периодами ежесуточных аномалий температуры (желательно использовать географическое разграничение для больших субъектов Российской Федерации, если прогностические температурные характеристики существенно варьируют по территории) (табл. 3).

*Таблица 3*

**Прогноз значительных положительных температурных аномалий  
в субъектах Российской Федерации**

| <b>№<br/>п/п</b> | <b>Субъект<br/>федерации</b>                       | <b>Период<br/>действия<br/>прогноза</b> | <b>Аномалия<br/>температуры воздуха<br/>за прогностический<br/>период, °С</b> | <b>Среднесуточная<br/>температура<br/>воздуха, °С</b> |
|------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 1                | Ямало-Ненецкий автономный округ                    | 12–15 июня                              | 12...7                                                                        | 15...10                                               |
| 2                | Таймырский муниципальный район Красноярского края  | 12–17 июня                              | 12...7                                                                        | 17...12                                               |
| 3                | Эвенкийский муниципальный район Красноярского края | 13–17 июня                              | 13...8                                                                        | 28...24                                               |
| 4                | Туруханский муниципальный район Красноярского края | 12–16 июня                              | 12...7                                                                        | 28...23                                               |
| 5                | Северные районы Иркутской области                  | 14–17 июня                              | 11...7                                                                        | 27...23                                               |
| 6                | Западные районы Республики Саха (Якутия)           | 12–17 июня                              | 12...7                                                                        | 27...22                                               |

По прогностической карте аномалий температуры воздуха по территории России на декаду (материалы 4.5) и анализу синоптической ситуации по гидродинамическим схемам (до 168 ч) оценивается продолжительность периода с аномалией +7 °С и выше. В силу объективных оценок прогностических схем, не стоит периодом действия прогноза охватывать более шести суток. При необходимости можно через 2–3 дня сделать уточнение к данному прогнозу; используя таблицы

прогноза средней пентадной температуры воздуха и ее аномалии по субъектам Российской Федерации (материалы 4.4) и прогноза экстремально высокой температуры воздуха (по пунктам) по субъектам Российской Федерации (материалы 4.5) с учетом возможной прогнозстической корректировки заполняются два правых столбца табл. 3; после проверки полученных данных оформляется установленный бланк предупреждения, на основании табл. 3. Отправляется информация в адреса членов Правительственной комиссии и территориальные Управления Росгидромета, на территории которых располагаются регионы, отмеченные в табл. 3.

Учитывая опыт составления данных прогнозов ОЯ в течение прошедших теплых (летних) периодов, следует отметить высокое качество автоматизированных прогнозов по схеме РЭП. Прогнозист в большинстве случаев вносит лишь незначительные изменения в результаты расчетов по данной схеме.

Испытания метода проводились в течение двух теплых сезонов – 2015 и 2016 гг. Рассчитывались оценки оправдываемости для критерия Пирси–Обухова (1), общей оправдываемости (2) и др. (3)–(6) для 27 районов Российской Федерации. В основу списка районов было положено деление, принятое для прогнозов преобладающей температуры воздуха, размещаемых на 4-й странице Ежедневного гидрометеорологического бюллетеня ФГБУ «Гидрометцентр России» (ЕГМБ) с некоторой дополнительной детализацией. Количественные значения характеристик успешности рассчитывались по формулам:

$$T = n11 / n01 \quad n12 / n02 \quad - \text{критерий качества Пирси–Обухова; (1)}$$

$$U = (n11 + n22) / n00 \quad - \text{общая оправдываемость; (2)}$$

$$U_1 = n11 / n10 \quad - \text{оправдываемость прогноза наличия ОЯ; (3)}$$

$$U_0 = n22 / n20 \quad - \text{оправдываемость прогноза отсутствия ОЯ; (4)}$$

$$П_1 = n11 / n01 \quad - \text{предупрежденность факта наличия ОЯ; (5)}$$

$$П_0 = n22 / n02 \quad - \text{предупрежденность факта отсутствия ОЯ; (6)}$$

Используемая для расчета характеристик успешности прогнозов (1)–(6) таблица сопряженности имеет следующий вид:

| Прогноз | Наблюдались |             | Сумма       |
|---------|-------------|-------------|-------------|
|         | ОЯ          | нет ОЯ      |             |
| ОЯ      | <i>n</i> 11 | <i>n</i> 12 | <i>n</i> 10 |
| нет ОЯ  | <i>n</i> 21 | <i>n</i> 22 | <i>n</i> 20 |
| Сумма   | <i>n</i> 01 | <i>n</i> 02 | <i>n</i> 00 |

Результаты испытаний представлены в табл. 4.

*Таблица 4*

**Показатели оправдываемости прогнозов в теплые (летние) периоды 2015–2016 гг.  
(366 дат, 2052 станций Российской Федерации)**

| №<br>п/п | Район РФ                 | T    | U     | U <sub>1</sub> | U <sub>0</sub> | П <sub>1</sub> | П <sub>0</sub> |
|----------|--------------------------|------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1        | Запад СЗФО               | 0,65 | 92,62 | 76,09          | 95,00          | 68,63          | 96,51          |
| 2        | Восток СЗФО              | 0,75 | 87,43 | 85,00          | 89,32          | 86,08          | 88,46          |
| 3        | Север ЦФО                | 0,79 | 97,81 | 70,59          | 99,14          | 80,00          | 98,58          |
| 4        | Юг ЦФО                   | 0,71 | 95,63 | 73,33          | 97,62          | 73,33          | 97,62          |
| 5        | Север Приволжского ФО    | 0,77 | 95,36 | 89,80          | 96,21          | 78,57          | 98,39          |
| 6        | Юг Приволжского ФО       | 0,71 | 92,08 | 82,81          | 94,04          | 74,65          | 96,27          |
| 7        | ЮФО                      | 0,78 | 95,36 | 85,11          | 96,87          | 80,00          | 97,78          |
| 8        | СКФО                     | 0,76 | 96,99 | 80,77          | 98,24          | 77,78          | 98,53          |
| 9        | Ямало-Ненецкий АО        | 0,72 | 86,34 | 78,42          | 91,19          | 84,50          | 87,34          |
| 10       | Ханты-Мансийский АО      | 0,74 | 92,35 | 81,16          | 94,95          | 78,87          | 95,59          |
| 11       | Юг УралФО                | 0,80 | 95,08 | 83,33          | 97,12          | 83,33          | 97,12          |
| 12       | Таймыр (север СибФО)     | 0,64 | 85,79 | 77,45          | 89,02          | 73,15          | 91,09          |
| 13       | Туруханский<br>и Эвенкия | 0,73 | 89,89 | 81,72          | 92,67          | 79,17          | 93,70          |
| 14       | Запад юга СибФО          | 0,69 | 91,80 | 78,33          | 94,44          | 73,44          | 95,70          |
| 15       | Центр юга СибФО          | 0,76 | 94,81 | 83,67          | 96,53          | 78,85          | 97,45          |
| 16       | Восток юга СибФО         | 0,75 | 89,89 | 90,18          | 89,76          | 79,53          | 95,40          |
| 17       | Север Якутии (ДВФО)      | 0,54 | 82,51 | 65,96          | 88,24          | 65,96          | 88,24          |
| 18       | Юг Якутии (ДВФО)         | 0,69 | 98,09 | 63,64          | 99,15          | 70,00          | 98,88          |
| 19       | Запад Якутии (ДВФО)      | 0,58 | 92,08 | 70,00          | 94,79          | 62,22          | 96,26          |
| 20       | Восток Якутии (ДВФО)     | 0,59 | 96,45 | 70,59          | 97,71          | 60,00          | 98,55          |

Таблица 4 (окончание)

| №<br>п/п | Район РФ                                 | T    | U     | U <sub>1</sub> | U <sub>0</sub> | П <sub>1</sub> | П <sub>0</sub> |
|----------|------------------------------------------|------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 21       | Центр Якутии (ДВФО)                      | 0,60 | 92,08 | 93,02          | 91,95          | 60,61          | 99,00          |
| 22       | Амурская (ДВФО)                          | 0,98 | 97,81 | 65,22          | 100,00         | 100,00         | 97,72          |
| 23       | Магаданск (ДВФО)                         | 0,71 | 97,54 | 57,14          | 99,15          | 72,73          | 98,31          |
| 24       | Чукотка (ДВФО)                           | 0,71 | 90,71 | 76,71          | 94,20          | 76,71          | 94,20          |
| 25       | Камчатка (ДВФО)                          | 0,55 | 97,27 | 75,00          | 98,02          | 56,25          | 99,14          |
| 26       | Хабаровский край,<br>Еврейская АО (ДВФО) | 0,57 | 88,52 | 78,33          | 90,52          | 61,84          | 95,52          |
| 27       | Приморье (ДВФО)                          | 0,46 | 96,99 | 70,00          | 97,75          | 46,67          | 99,15          |
|          | Средние                                  | 0,69 | 92,94 | 77,16          | 94,95          | 73,44          | 95,94          |

Метод прогноза ОЯ и результаты испытаний (изложенные выше) докладывались на Секции метеорологических прогнозов Ученого Совета Гидрометцентра России 13 декабря 2016 г. и 15 декабря 2016 г. на заседании Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП), которая приняла следующее решение: учитывая представленные результаты оперативных испытаний, внедрить «Метод прогноза опасного природного явления – аномально жаркой погоды – на 48–144 часа для территории России» (Гидрометцентр России, Р.М. Вильфанд, П.П. Васильев, В.И. Лукьянов, А.Д. Голубев, Е.Л. Васильева) в качестве основного в оперативную практику Гидрометцентра России.

#### Список литературы

1. РД 52.88.699–2008. Положение о порядке действий учреждений и организаций при угрозе возникновения и возникновении опасных природных явлений.

2. Вильфанд Р.М., Васильев П.П., Васильева Е.Л., Веселова Г.К., Горлач И.А. Среднесрочный прогноз температуры воздуха и возникновения некоторых ОЯ по технологии Гидрометцентра России // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 10. – С. 5–14.

*Л.М. Псаломщикова, Е.М. Акентьева*

## **МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ СЛОЯ СВЕЖЕВЫПАВШЕГО СНЕГА ПО ДАННЫМ АВТОМАТИЧЕСКИХ ОСАДКОМЕРОВ ОТТ PLUVIO<sup>2</sup> 200 И МЕТЕОСТАНЦИЙ НА ТЕРРИТОРИИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА И БЛИЖАЙШИХ ПРИГОРОДОВ**

### **1. Область применения**

Методика разработана для определения высоты свежесвыпавшего снега по данным автоматизированной информационной сети учета атмосферных осадков (АИС «Осадки») Санкт-Петербурга, в которую входят 34 пункта, оборудованные автоматическими осадкомерами ОТТ Pluvio<sup>2</sup> 200, метеостанции и посты, расположенные на территории Санкт-Петербурга и ближайших пригородов.

Измерение высоты (толщины) слоя свежесвыпавшего снега не входит в программу стандартных метеорологических наблюдений, однако высокая востребованность этих данных и невозможность ее качественного удовлетворения характерны для всех регионов России, что неоднократно отмечалось специалистами Гидрометслужбы Российской Федерации на совещаниях по обеспечению потребителей специализированной гидрометеорологической информацией.

В первую очередь в информации о свежесвыпавшем снеге заинтересованы организации, занимающиеся обеспечением дорожного движения, транспортные компании, коммунальные службы, специалисты ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», обеспечивающие уборку и доставку снега на снегоприемные и снегоплавильные пункты с целью его утилизации.

## 2. Общие положения

На государственной наблюдательной сети один раз в сутки производятся наблюдения только за высотой снежного покрова [5], которая определяется на основании измерений расстояния от поверхности земли до поверхности снежного покрова с помощью стационарной снегомерной рейки. По этим данным можно оценить изменение высоты снежного покрова за прошедшие сутки (за счет снегопада или других осадков, метелевого переноса, таяния, уплотнения, испарения).

В Канаде и США измерения высоты свежевыпавшего снега проводятся на снегомерных площадках или с помощью снегомерных досок, поверхность которых расчищается от старого снега до начала снегопада. В качестве снегомерной доски используется фанерная доска или пластина из легкого металла размером не менее 40×40 см, поверхность которой закрашивается белой краской или обтягивается белой фланелью [7].

Аналогичные наблюдения по просьбе заинтересованных организаций были организованы в 1965 году в Ленинграде [4]. Измерение высоты слоя свежевыпавшего снега до 2004 г. производилось два раза в сутки (в 09 и 21 ч МСК), затем каждые три часа. В настоящее время наблюдения за высотой свежевыпавшего снега ведутся на семи метеостанциях и постах Санкт-Петербурга.

## 3. Способы расчета высоты слоя свежевыпавшего снега

При отсутствии наблюдений высота слоя свежевыпавшего снега может быть косвенно определена по его плотности. Для пересчета плотности снега в его высоту используется зависимость [3]:

$$H_{s,f} = \frac{p_s \cdot \rho_w}{\rho_{s,f}} ; \quad (1)$$

где  $H_{s,f}$  — высота свежевыпавшего снега, см;  $p_s$  — сумма осадков, мм;  $\rho_w$  — плотность воды (1000 кг/м<sup>3</sup>);  $\rho_{s,f}$  — плотность свежевыпавшего снега, кг/м<sup>3</sup>.

Плотность свежевыпавшего снега зависит от метеорологических условий при выпадении снега (приземных температуры воздуха и скорости ветра), а также от структуры и размера снежных кристаллов, формирование которых определяется метеорологическими условиями на высоте 2–5 км.

Различные способы определения плотности свежеснегавшего снега в зависимости от температуры приземного воздуха довольно подробно рассмотрены в [1, 3, 8]. В частности, в [3] приводятся следующие алгоритмы определения плотности свежеснегавшего снега, используемые в атмосферном моделировании:

– алгоритм, базирующийся на модели подстилающей поверхности CLASS

$$\begin{aligned}\rho_{s,f} &= 67,92 + 51,25 e^{\frac{T_a}{2,59}}, \quad T_a \leq 0^\circ\text{C}; \\ \rho_{s,f} &= \min(200; 119,2 + 20T_a), \quad T_a > 0^\circ\text{C}\end{aligned}\quad (2)$$

где  $T_a$  – температура воздуха,  $^\circ\text{C}$ ;

– алгоритм определения плотности свежеснегавшего снега, используемый в блоке описания процессов на подстилающей поверхности TERRA (блок модели COSMO):

$$\rho_{snow,fresh} = \rho_{s,f,min} + (\rho_{s,f,max} - \rho_{s,f,min}) \frac{T_{low} - T_{min}}{T_0 - T_{min}}, \quad (3)$$

где:

$$\rho_{s,f,min} = 50 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{s,f,max} = 150 \text{ кг/м}^3;$$

точка заморзания  $T_0 = 273,16 \text{ К}$ ;

$$T_{min} = 258,15 \text{ К};$$

$T_{low}$  – температура самого нижнего модельного уровня атмосферы.

Данные алгоритмы были использованы при анализе исходных данных и тестирования разработанной методики.

#### 4. Цель разработки методики

Целью разработки методики является разработка способа преобразования данных о количестве твердых осадков, измеренных осадкомером и выраженных в толщине водного слоя (мм), в толщину (высоту) слоя свежеснегавшего снега (см).

Для этого была исследована зависимость между этими параметрами при различной температуре воздуха во время снегопадов.

В результате были получены коэффициенты перехода от количества выпавших твердых осадков в мм к соответствующей высоте слоя снега в см.

## 5. Анализ исходных данных, использованных при разработке методики

Основой для выполнения данной работы явились параллельные ряды полусуточных (в 06 и 18 ч ВСВ) значений параметров на метеостанции Санкт-Петербург за период с 1985 по 2014 г. по следующим характеристикам:

- высота свежеснегоснежного покрова, см;
- количество соответствующих осадков, измеренных осадкомером Третьякова, выраженных в водном эквиваленте, мм;
- средняя приземная температура воздуха в период выпадения осадков, °С;
- средняя скорость ветра в период выпадения осадков, м/с;
- время выпадения осадков и их вид.

Методика разработана только для случаев выпадения атмосферных осадков в виде снега и мокрого снега. Если хотя бы кратковременно в период выпадения осадков отмечались дождь или морось, данные из выборки исключались.

Высота слоя свежеснегоснежного покрова ( $H_{\text{см}}$ ) на метеостанции Санкт-Петербург измеряется на специальных планшетах, установленных на метеоплощадке, при помощи градуированной линейки. После снятия показаний снег с планшета счищается.

Количество твердых осадков ( $R_{\text{мм}}$ ) измеряется с помощью осадкомера Третьякова. Оно соответствует толщине слоя воды в мерном стакане, образовавшегося после растапливания попавшего во время снегопада в ведро осадкомера снега.

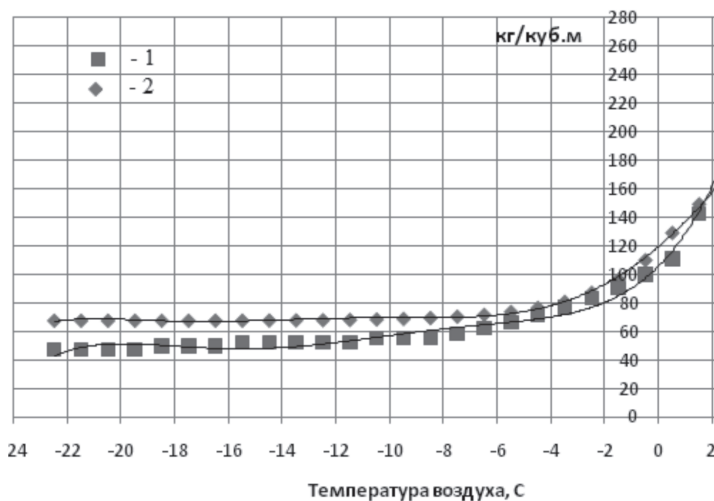
Для анализа было отобрано 2397 пар полусуточных значений высоты слоя свежеснегоснежного покрова (см) и соответствующего количества осадков (мм).

Наиболее тщательному контролю подвергались данные о высоте свежеснегоснежного покрова через его плотность ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ).

Из исходного массива также были исключены случаи, когда расчетные значения плотности свежеснегоснежного покрова оказались менее 30 или 300  $\text{кг}/\text{м}^3$  и более. Выбор таких граничных условий основывался на анализе большого числа исследований в этой области [2, 3, 8].

Откорректированный массив исходных данных о высоте свежеснегоснежного покрова был разбит по одноградусным грациям температуры воздуха и для каждой грации рассчитана средняя плотность

свежевыпавшего снега по данным наблюдений в Санкт-Петербурге и по эмпирической формуле (2). Результаты сравнения зависимостей плотностей от приземной температуры воздуха во время выпадения снега представлены на рис. 1.



**Рис. 1. Плотность свежевыпавшего снега, рассчитанная по данным наблюдений на метеостанции Санкт-Петербург (1) и по эмпирической формуле (2) [3] при различной средней температуре воздуха во время снегопада.**

Полученная зависимость дает реальные значения плотности снега в интервале от 50 до 160 кг/м<sup>3</sup>, однако они систематически меньше значений, рассчитанных согласно параметризациям (2) в диапазоне температур ниже –10 °C.

Влияние ветра на плотность снега не рассматривалось, так как оно может быть значимо только при средних скоростях ветра во время снегопадов более 5 м/с [1, 8]. В использованном массиве исходных данных по Санкт-Петербургу на такие случаи приходится только 6,5 %.

## **6. Методика определения высоты свежевыпавшего снега**

### **6.1. Определение коэффициентов перехода от количества твердых осадков (мм) к высоте слоя снега (см)**

По данным откорректированных рядов наблюдений о высоте свежевыпавшего снега ( $H_{\text{см}}$ ) и количестве твердых осадков, измеренных

осадкомером Третьякова ( $R_{\text{мм}}$ ), для каждого случая выпадения снега рассчитывалось отношение ( $H_{\text{см}}/R_{\text{мм}}$ ). Затем все отношения ( $H_{\text{см}}/R_{\text{мм}}$ ) группировались в зависимости от средней за снегопад приземной температуры воздуха и для каждой градации температуры рассчитывалось среднее значение ( $H_{\text{см}}/R_{\text{мм}}$ ), среднее квадратическое отклонение и средняя квадратическая ошибка среднего значения (табл. 1).

Как видно из таблицы, в интервале температур от 1,5 до  $-14,0^{\circ}\text{C}$  ошибка среднего значения ( $H_{\text{см}}/R_{\text{мм}}$ ) не превышает 5 %. При температурах выше  $+2,0^{\circ}\text{C}$  и ниже  $-16,0^{\circ}\text{C}$ , когда резко уменьшается число снегопадов, ошибка возрастает в два-три раза.

Наиболее четко зависимость отношения ( $H_{\text{см}}/R_{\text{мм}}$ ) от температуры проявляется в интервале от  $+1,5$  до  $-12,0^{\circ}\text{C}$ . При этих условиях в регионе Санкт-Петербурга и пригородов отмечается более 90 % снегопадов. При более низких температурах отношение ( $H_{\text{см}}/R_{\text{мм}}$ ) остается практически постоянным.

В результате проведенного анализа было принято решение принять средние значения отношения ( $H_{\text{см}}/R_{\text{мм}}$ ) в качестве коэффициента перехода от количества осадков ( $R_{\text{мм}}$ ) к высоте слоя свежеснегавшего снега ( $H_{\text{см}}$ ) с точностью, указанной в табл. 1:

$$K_{\text{ср}} = H_{\text{см}}/R_{\text{мм}}. \quad (4)$$

Зависимость значений  $K_{\text{ср}}$  от средней за снегопад приземной температуры воздуха может быть выражена следующим уравнением:

$$K_{\text{ср}} = -0,002 t^2 - 0,113 t + 0,937. \quad (5)$$

Графически эта зависимость представлена на рис. 2.

## 6.2. Алгоритм расчета высоты свежеснегавшего снега

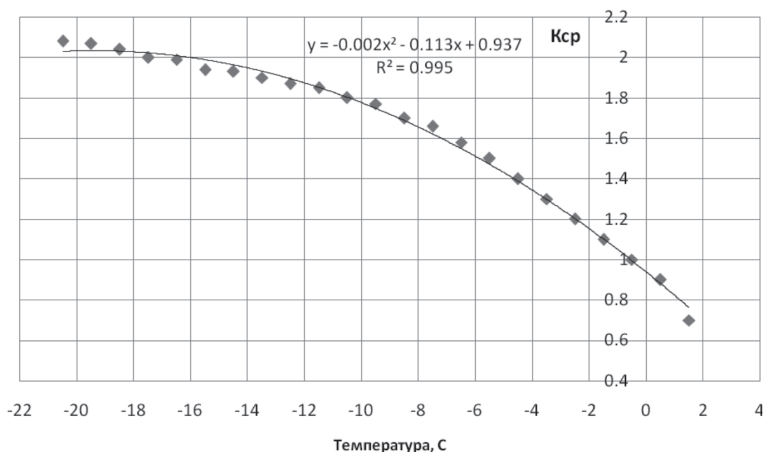
При оперативной оценке высоты свежеснегавшего снега потребителю необходимо определить:

- среднюю за период выпадения твердых осадков (снег, мокрый снег) температуру воздуха ( $T_{\text{ср}}^{\circ}\text{C}$ );
- сумму твердых осадков, выраженную в толщине водного слоя ( $R_{\text{тв.ос,мм}}$ );
- средний коэффициент ( $K_{\text{ср}}$ ) перехода от водного эквивалента твердых осадков в мм к высоте слоя свежеснегавшего снега ( $H_{\text{расч}}$ ) в см по табл. 1 или по формуле (5);

Таблица 1

**Статистические характеристики отношения ( $H_{\text{сн}}/R_{\text{мм}}$ )  
при разной температуре воздуха, осредненной за период снегопада**

|                               |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |
|-------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Температура, °C               | $\leq -20,0$         | $-20,0 -$<br>$-19,0$ | $-19,0 -$<br>$-18,0$ | $-18,0 -$<br>$-17,0$ | $-17,0 -$<br>$-16,0$ | $-16,0 -$<br>$-15,0$ | $-15,0 -$<br>$-14,0$ | $-14,0 -$<br>$-13,0$ |
| Число случаев                 | 9                    | 5                    | 8                    | 12                   | 10                   | 28                   | 29                   | 34                   |
| $H_{\text{сн}}/R_{\text{мм}}$ | 2,1                  | 2,1                  | 2,0                  | 2,0                  | 2,0                  | 1,9                  | 1,9                  | 1,9                  |
| $\sigma$                      | 0,8                  | 0,7                  | 0,6                  | 0,6                  | 0,6                  | 0,7                  | 0,6                  | 0,5                  |
| $(\sigma/\sqrt{n})$           | 0,27                 | 0,31                 | 0,20                 | 0,17                 | 0,19                 | 0,14                 | 0,12                 | 0,09                 |
| $(\sigma/\sqrt{n}) \%$        | 13                   | 15                   | 10                   | 9                    | 10                   | 7                    | 6                    | 5                    |
| Температура, °C               | $-13,0 -$<br>$-12,0$ | $-12,0 -$<br>$-11,0$ | $-11,0 -$<br>$-10,0$ | $-10,0 -$<br>$-9,0$  | $-9,0 -$<br>$-8,0$   | $-8,0 -$<br>$-7,0$   | $-7,0 -$<br>$-6,0$   | $-6,0 -$<br>$-5,0$   |
| Число случаев                 | 36                   | 48                   | 71                   | 91                   | 76                   | 97                   | 103                  | 148                  |
| $H_{\text{сн}}/R_{\text{мм}}$ | 1,9                  | 1,9                  | 1,8                  | 1,8                  | 1,8                  | 1,7                  | 1,6                  | 1,5                  |
| $\sigma$                      | 0,6                  | 0,5                  | 0,7                  | 0,6                  | 0,6                  | 0,6                  | 0,6                  | 0,5                  |
| $(\sigma/\sqrt{n})$           | 0,09                 | 0,08                 | 0,08                 | 0,07                 | 0,07                 | 0,06                 | 0,06                 | 0,04                 |
| $(\sigma/\sqrt{n}) \%$        | 5                    | 4                    | 4                    | 4                    | 4                    | 4                    | 4                    | 3                    |
| Температура, °C               | $-5,0 -$<br>$-4,0$   | $-4,0 -$<br>$-3,0$   | $-3,0 -$<br>$-2,0$   | $-2,0 -$<br>$-1,0$   | $-1,0 -$<br>$0,0$    | $0,0 -$<br>$1,0$     | $1,0 -$<br>$2,0$     | $\geq 2,0$           |
| Число случаев                 | 143                  | 184                  | 186                  | 200                  | 232                  | 224                  | 52                   | 7                    |
| $H_{\text{сн}}/R_{\text{мм}}$ | 1,4                  | 1,3                  | 1,2                  | 1,1                  | 1,0                  | 0,9                  | 0,7                  | 0,6                  |
| $\sigma$                      | 0,5                  | 0,3                  | 0,3                  | 0,2                  | 0,2                  | 0,2                  | 0,2                  | 0,2                  |
| $(\sigma/\sqrt{n})$           | 0,04                 | 0,03                 | 0,02                 | 0,18                 | 0,01                 | 0,01                 | 0,02                 | 0,08                 |
| $(\sigma/\sqrt{n}) \%$        | 3                    | 2                    | 2                    | 2                    | 1                    | 1                    | 3                    | 13                   |



**Рис. 2. Зависимость величины коэффициента  $K_{\text{ср}} = H_{\text{см}}/R_{\text{мм}}$  от средней температуры воздуха в период выпадения снега.**

— выполнить расчет по формуле:

$$H_{\text{расч, см}} = R_{\text{тв. ос, мм}} \cdot K_{\text{ср}}. \quad (6)$$

Все характеристики рассчитываются за периоды выпадения твердых осадков внутри полусуточных интервалов: ночь — с 18 ч до 06 ч, или день — с 06 ч до 18 ч ВСВ.

## **7. Тестирование методики определения высоты слоя свежевыпавшего снега по данным о количестве осадков, измеренных с помощью автоматических осадкомеров Pluvio<sup>2</sup> 200**

### **7.1. Исходные данные для тестирования методики**

Для тестирования разработанной методики использованы данные городской метеостанции Санкт-Петербург и двух метеостанций, расположенных в пригородах (Ломоносов и Кронштадт), входящих в АИС «Осадки». На этих метеостанциях ведутся измерения осадков автоматическим осадкомером Pluvio<sup>2</sup> 200, осадкомером Третьякова, а также измеряется высота свежевыпавшего снега и приземная температура.

Для тестирования методики использованы данные только за январь и февраль 2015 и 2016 гг., поскольку в остальные месяцы

осенне-зимнего сезона из-за аномально теплой погоды наблюдались лишь единичные случаи выпадения снега и мокрого снега.

## 7.2. Сравнение расчетной и фактической высоты свежевыпавшего снега

Точность расчетов высоты слоя свежевыпавшего снега с использованием разработанной методики оценивалась по разности между рассчитанной и фактической высотой слоя свежевыпавшего снега  $\Delta = (H_{\text{расч}} - H_{\text{факт}})$  при конкретных снегопадах за полусуточные интервалы времени.

Как видно из табл. 2, рассчитанная высота свежевыпавшего снега хорошо согласуется с фактически наблюдаемой: средняя абсолютная величина отклонения на всех трех станциях не превышает 0,8 см, средняя квадратическая ошибка находится в интервале 0,8–1,1.

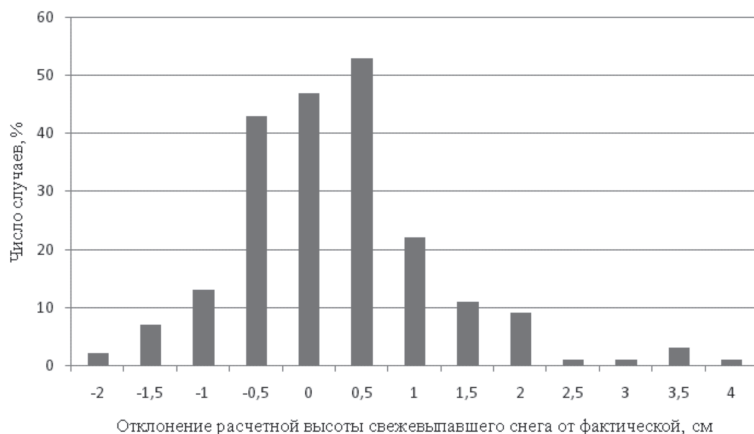
Таблица 2

**Разности между высотой свежевыпавшего снега, фактической и рассчитанной различными методами**

| Характеристики                         | Станции   | $\Delta (H_{\text{расч}} - H_{\text{факт}}), \text{ см}$ |            |            |            |
|----------------------------------------|-----------|----------------------------------------------------------|------------|------------|------------|
|                                        |           | $\Delta_1$                                               | $\Delta_2$ | $\Delta_3$ | $\Delta_4$ |
| Среднее отклонение, см                 | СПб       | <b>−0,3</b>                                              | −0,7       | −0,6       | −1,0       |
|                                        | Кронштадт | <b>−0,1</b>                                              | −0,6       | −0,4       | −0,8       |
|                                        | Ломоносов | <b>−0,2</b>                                              | −0,6       | −0,5       | −1,0       |
| Среднее абсолютное отклонение, см      | СПб       | <b>0,8</b>                                               | 1,0        | 0,8        | 1,12       |
|                                        | Кронштадт | <b>0,6</b>                                               | 0,8        | 0,7        | 0,9        |
|                                        | Ломоносов | <b>0,7</b>                                               | 0,9        | 0,8        | 1,12       |
| Максимальное абсолютное отклонение, см | СПб       | <b>3,3</b>                                               | 5,4        | 3,5        | 5,5        |
|                                        | Кронштадт | <b>2,1</b>                                               | 2,9        | 2,1        | 3,3        |
|                                        | Ломоносов | <b>2,9</b>                                               | 3,2        | 3,4        | 4,8        |
| Среднее квадратическое отклонение      | СПб       | <b>1,11</b>                                              | 1,38       | 1,15       | 1,56       |
|                                        | Кронштадт | <b>0,83</b>                                              | 1,07       | 0,86       | 1,19       |
|                                        | Ломоносов | <b>1,01</b>                                              | 1,23       | 1,16       | 1,62       |

Важно отметить, что в предложенном методе косвенного определения высоты свежевыпавшего снега не прослеживается систематической ошибки. Это подтверждается разными знаками разностей между рассчитанными и фактическими значениями (рис. 3).

Кроме рассчитанных по разработанной методике ГГО значений высоты снега ( $\Delta_1$ ) были произведены дополнительные расчеты по независимым алгоритмам, не связанным с измерениями высоты снега: с использованием постоянной плотности снега  $100 \text{ кг/м}^3$  ( $\Delta_2$ ), формуле (2) алгоритма CLASS ( $\Delta_3$ ), формуле (3) в блоке TERRA модели COSMO ( $\Delta_4$ ) (табл. 2).



**Рис. 3. Повторяемость (%) отклонений расчетной высоты свежевыпавшего снега от фактической высоты.**

Как видно из табл. 2, рассчитанная по методике ГГО ( $\Delta_1$ ) высота слоя свежевыпавшего снега ближе к измеренным значениям, чем по другим алгоритмам. Это наглядно видно по средним, абсолютным и средним квадратическим отклонениям.

Следует отметить некоторое занижение расчетной высоты снега, как по разработанной методике, так и по другим алгоритмам (отрицательные значения средних отклонений), но по методике ГГО занижение существенно меньше.

Достоинством методики является простота в использовании и возможность получать не только фактические, но и прогностические значения высоты слоя свежевыпавшего снега. Для прогноза высоты слоя свежевыпавшего снега используются данные модельных расчетов количества осадков (их рассчитывают практически все модели) и средняя за снегопад температура воздуха, которую синоптик прогнозирует с учетом синоптической ситуации.

К недостаткам методики можно отнести увеличение погрешности определения высоты слоя свежевыпавшего снега при понижении температуры воздуха ниже  $-13^{\circ}\text{C}$ , обусловленное уменьшением количества снегопадов при этих температурах.

ЦМКП Росгидромета рекомендовала:

— внедрить «Методику определения высоты слоя свежевыпавшего снега по данным о количестве осадков (осадкомеры ОТТ Pluvio<sup>2</sup> 200, осадкомеры Третьякова) и приземной температуре воздуха в оперативную работу ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» и ФГБУ «Северо-Западное УГМС» для гидрометеорологического обеспечения потребителей Санкт-Петербурга и западной части Ленинградской области, заинтересованных в данной информации;

— авторам продолжить работу по совершенствованию методики в области статистической обработки высоты свежевыпавшего снега и расширения области применения данного регионального метода за счет включения в выборку данных наблюдений для восточных областей Ленинградской области, характеризующихся другими режимами изменения температуры воздуха и скорости ветра в период выпадения снега.

#### Список литературы

1. Богданова Э.Г., Ильин Б.М., Гаврилова С.Ю. Современные методы коррекции измеренных осадков и результаты их применения в полярных регионах России и Северной Америки // Метеорология и гидрология. — 2007. — № 4. — С. 21–44.
2. Войтковский К.Ф. Механические свойства снега. — М.: Наука, 1977. — 126 с.
3. Казакова Е.В., Чумаков М.М., Розинкина И.А. Алгоритм расчета высоты свежевыпавшего снега, предназначенный для постпроцессинга систем атмосферного моделирования (на примере COSMO) // Труды Гидрометцентра России. — 2013. — Вып. 350. — С. 195–212.
4. Климат Ленинграда / Под ред. Ц.А. Швер. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 254 с.
5. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 3. Часть 1. — Л.: Гидрометеиздат, 1985. — 300 с.
6. РД 52.04.839-2016. Методические указания по производству и обработке данных наблюдений за атмосферными осадками на автоматических метеорологических постах. — 27 с.
7. Снег: Справочник / Под ред. Д. М. Грея, Д.Х. Мэйла; Перевод с англ. — Л. Гидрометеиздат, 1986. — 751 с.
8. Meister R. Density of new snow and its dependence on air temperature and wind // Proceedings of Workshop on the Correction of Precipitation Measurements Zurcher Geographische Schriften. Heft 23. — 1986. — P. 73–80.

*Т.В. Старостина, И.Г. Ковригина*

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА УРОЖАЙНОСТИ ОДНОЛЕТНИХ И МНОГОЛЕТНИХ ТРАВ ПО НОВОСИБИРСКОЙ, КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТЯМ И АЛТАЙСКОМУ КРАЮ**

Методы прогноза урожайности однолетних и многолетних трав по Новосибирской, Кемеровской областям и Алтайскому краю разработаны в рамках выполнения региональной темы 1.7.45 Плана НИОКР Росгидромета (авторы – Т.В. Старостина, ФГБУ «СибНИГМИ»; И.Г. Ковригина, ГМЦ ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС»; Г.Н. Тюкало, Кемеровский ЦГМС – филиал ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС»; Е.И. Янова, Алтайский ЦГМС – филиал ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС»).

Методы прогноза урожайности однолетних и многолетних трав базируются на физико-статистических моделях, отражающих связи между урожайностью трав и основными метеорологическими и агрометеорологическими факторами. Испытание методов проводилось по четырем прогностическим моделям, позволяющим прогнозировать урожайность однолетних и многолетних трав на сено и зеленую массу на сроки 1–2 июня и 1–2 июля, отличающимся друг от друга набором показателей метеорологических и агрометеорологических факторов.

Агрометеорологические параметры, используемые в качестве потенциальных предикторов, выбирались из данных наблюдений гидрометеорологических станций. Наиболее важным периодом в формировании урожайности трав является период их цветения (май–июнь). Для построения прогностических моделей были использованы параметры, достаточно хорошо описывающие агрометеорологические условия вегетационного периода.

Основными климатическими факторами роста и формирования урожая многолетних и однолетних трав является тепло- и влагообеспеченность вегетационного периода. С большей достоверностью влагообеспеченность сельскохозяйственных культур характеризуют комплексные показатели увлажнения: показатель увлажнения по Н.В. Гулиновой [1], гидротермический коэффициент Г.Т. Селянинова [2]. Ввиду отсутствия биометрических показателей трав были исследованы связи областной (краевой) урожайности трав с метеорологическими показателями влагообеспеченности осеннего периода предшествующего года и тепло- и влагообеспеченности весенне-летнего периода текущего года [3]. Наибольшую значимость имеют осадки за зимне-весенний и летний периоды. Существенные связи наблюдаются с дефицитом влажности воздуха, а также с показателями увлажнения Н.В. Гулиновой на конец мая и конец июня.

Для выполнения расчетов была разработана технологическая линия, включающая пакет программ для персонального компьютера и материалы информационного обеспечения: программу автоматизированного сбора информации из электронной версии таблиц ТСХ-1 по станциям, программу расчета прогноза урожайности многолетних и однолетних трав по территории Новосибирской, Кемеровской областей и Алтайского края и программу оценки прогноза.

Авторские испытания метода прогноза урожайности многолетних и однолетних трав по территории Новосибирской, Кемеровской областей и Алтайского края проводились на независимом материале 2009–2011 гг. Производственные испытания метода осуществлялись в отделе агрометпрогнозов ГМЦ, в отделе агрометеорологии и агрометеорологических прогнозов Алтайского ЦГМС – филиала ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС», в ОГСН Кемеровского ЦГМС – филиала ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» в 2012–2015 гг. в оперативном и квазиоперативном режимах. Анализ и обобщение полученных результатов проводились в отделе агрометпрогнозов Гидрометцентра.

Оценка успешности метода прогноза урожайности трав по территории Новосибирской, Кемеровской областей и Алтайского края проводилась согласно РД 52.27.284-91 [4]. Сравнительная оценка успешности испытываемых методов осуществлялась с инерционными и климато-логическими прогнозами, а также с используемыми в настоящее время

в оперативной практике агрометеорологов Центров методами прогноза урожайности многолетних трав на сено по Новосибирской области (автор — Н.В. Гулинова), прогноза урожайности многолетних трав на зеленую массу по Кемеровской области (автор — Г.А. Моисеева, ФГБУ «СибНИГМИ»), прогноза урожайности многолетних трав на сено по территории Алтайского края (автор — Э.Г. Рудычева, СибНИГМИ).

С целью получения более достоверных выводов об испытываемом методе были проанализированы результаты оправдываемости прогнозов за период 2009–2015 гг., включающий авторские и производственные испытания.

К достоинствам новых методов можно отнести следующее:

- методы позволяют прогнозировать урожайность многолетних и однолетних трав на два срока (предварительный и уточненный), что актуально в настоящее время;
- расчеты прогнозов полностью автоматизированы, включая выборку данных из электронной версии таблиц ТСХ-1;
- автоматизирована оценка прогнозов.

### **Результаты испытаний по Новосибирской области**

По результатам авторской проверки (2009–2011 гг.) методические прогнозы урожайности однолетних трав на зеленую массу и многолетних трав на сено по Новосибирской области по всем моделям в течение трех лет обеспечили хороший результат — средняя оправдываемость 80,3–96,0 %. Лишь в 2009 г. оправдываемость методических прогнозов урожайности однолетних трав на зеленую массу по моделям 1–3 была ниже принятого порога успешности агрометеорологических прогнозов и составила 64,0–75,0 %. Низкая оправдываемость методических прогнозов в 2009 г. в оба срока обусловлена недобором осадков в мае и значительным дефицитом тепла в июне (средняя температура воздуха была ниже нормы на 5...6 °С).

Оценка качества методических прогнозов урожайности однолетних на зеленую массу и многолетних на сено Новосибирской области в годы производственных испытаний (2012–2015 гг.) показала, что оправдываемость методических прогнозов урожайности однолетних трав на зеленую массу оказалась ниже на 5,5–12,3 %, чем в годы авторских испытаний, и составила в среднем 68,9–82,4 %, что на уровне и ниже

порога успешности агрометеорологических прогнозов. Успешность методических прогнозов урожайности многолетних трав на сено за годы оперативной проверки также несколько хуже (на 2,1–9,6 %), но она достаточно высокая (82,8–91,4 %) и соответствует уровню качества агрометеорологических прогнозов.

В годы оперативных испытаний менее удачными были методические прогнозы урожайности однолетних трав на зеленую массу, особенно в 2012 году: прогнозируемая урожайность однолетних трав как в первый, так и во второй срок превысила допустимую погрешность на 5–11 ц/га. Низкая оправдываемость методических прогнозов объясняется крайне засушливыми условиями, сложившимися в весенне-летний период. Средняя оправдываемость методических прогнозов урожайности однолетних трав по Новосибирской области (срок 1–2 июня) в годы оперативных испытаний (2012–2015 гг.) составила 68,9–75,3 %, что выше оправдываемости инерционных и климатологических прогнозов по модели 1 на 0,6–6,7 % соответственно, на 7 % выше инерционных прогнозов и на уровне климатологических по модели 2. В среднем за весь период испытаний оправдываемость предварительных методических прогнозов (на срок 1–2 июня) составила по модели 1 – 73,8 %, по модели 2 – 77,7 %, что выше оправдываемости инерционных (на 5,5–9,4 %) и в случае модели 2 – климатологических (на 2,1 %) прогнозов (табл. 1).

Из методических прогнозов урожайности однолетних трав на зеленую массу по Новосибирской области, составленных в годы производственных испытаний в основной срок (1–2 июля), более успешными были прогнозы, рассчитанные по модели 4, их оправдываемость составила 82,4 %. Абсолютная ошибка прогнозов превысила допустимую погрешность на 2–7 ц/га. Средняя оправдываемость методических прогнозов по модели 4 за весь период проверки составила 85,3 %, это на 7,4 % выше успешности прогнозов, составленных по модели 3.

Оценка качества методических прогнозов урожайности многолетних трав на сено по Новосибирской области в годы производственных испытаний (2012–2015 гг.) показала, что оправдываемость методических прогнозов урожайности многолетних трав была достаточно высокой, как и в годы авторской проверки: в первый срок – 82,8–85,5 %, во второй – 91,3–91,4 %. Неудачными были методические прогнозы, составленные в 2013 г., причем в оба срока. Прогнозируемая урожайность

многолетних трав на сено как в первый, так и во второй срок превысила допустимую погрешность на 0,2–1,3 ц/га.

Таблица 1

**Оправдываемость прогнозов урожайности однолетних  
и многолетних трав по Новосибирской области**

| Культура                          |                                   | № прогностической модели | Оправдываемость                 |                                        |                               | Средняя оправдываемость, % |                   |
|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------|
|                                   |                                   |                          | авторские испытания (2009–2011) | производственные испытания (2012–2015) | средняя за период (2009–2015) | инерционные                | климатологические |
| Многолетние травы на сено         | предварительный прогноз, 1–2 июня | 1                        | 94,5                            | 85,5                                   | 89,4                          |                            | 58,4*             |
|                                   |                                   | 2                        | 92,4                            | 82,8                                   | 87,0                          |                            |                   |
|                                   | уточненный прогноз, 1–2 июля      | 3                        | 93,5                            | 91,4                                   | 92,3                          |                            | 78,1*             |
|                                   |                                   | 4                        | 96,0                            | 91,3                                   | 93,3                          |                            |                   |
| Однолетние травы на зеленую массу | предварительный прогноз, 1–2 июня | 1                        | 80,3                            | 68,9                                   | 73,8                          | 68,3                       | 75,6              |
|                                   |                                   | 2                        | 80,8                            | 75,3                                   | 77,7                          | 68,3                       | 75,6              |
|                                   | уточненный прогноз, 1–2 июля      | 3                        | 84,9                            | 72,6                                   | 77,9                          | 68,3                       | 75,6              |
|                                   |                                   | 4                        | 89,1                            | 82,4                                   | 85,3                          | 68,3                       | 75,6              |

*Примечание.* \* – Оправдываемость по методу Н.В. Гулиновой.

В 2013 г. из-за значительного недобора тепла и частого выпадения осадков в вегетационный период складывались крайне неблагоприятные условия для уборки трав на сено. План по заготовке сена был выполнен лишь на 70–80 %. В моделях учитываются тепло и осадки, но в 2013 году большое снижение урожайности трав произошло из-за крайне неблагоприятных условий уборки трав. 2013 год по погодным условиям во время уборки был аномальным. Поскольку такие периоды

встречаются крайне редко, их невозможно учесть при разработке методов и, следовательно, такие годы будут плохо оправдываться.

В среднем за весь период испытаний оправдываемость предварительных методических прогнозов урожайности многолетних трав на сено (на срок 1–2 июня) составила по модели 1 – 89,4 %, по модели 2 – 87,0 %, что значительно выше (на 28,6–31,0 %) оправдываемости используемого в настоящее время метода прогноза урожайности многолетних трав на сено по Новосибирской области (автор – Н.В. Гулинова). Успешность уточненных методических прогнозов (на срок 1–2 июля) составила по модели 3 – 92,3 %, по модели 4 – 93,3 %, что на 14,2–15,2 % выше оправдываемости прогнозов по методу Н.В. Гулиновой (табл. 1).

Решением Технического совета ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» от 27 апреля 2016 г. и ЦМКП от 27 мая 2016 г. рекомендованы к внедрению с 1 июня 2016 года в оперативную практику отдела агромет-прогнозов Гидрометцентра ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» «Методы прогноза урожайности многолетних трав на сено и однолетних трав на зеленую массу по Новосибирской области» в качестве основного на сроки 1–2 июня и 1–2 июля (для многолетних трав на сено – модели 1 и 4, для однолетних трав на зеленую массу – модели 2 и 4).

### **Результаты испытаний по Кемеровской области**

В Кемеровской области в период авторских испытаний (2009–2011 гг.) все методические прогнозы урожайности многолетних трав на сено и зеленую массу оправдались. Средняя оправдываемость методических прогнозов урожайности многолетних трав на сено и зеленую массу колебалась от 77,5 до 91,9 %.

По результатам производственных испытаний (2012–2015 гг.) методов прогнозов урожайности многолетних трав на сено и зеленую массу более успешными оказались методические прогнозы урожайности многолетних трав на сено. Причем в первый срок лучше сработала модель 1, во второй – модель 3. Средняя оправдываемость методических прогнозов, составленных по модели 1, составила 88,4 %, что несколько ниже, чем в годы авторских испытаний, и на 13,2 % выше успешности прогнозов по модели 2 для предварительного срока. Методические прогнозы, составленные во второй срок по модели 3, имели высокую оправдываемость – 90 %, что несколько ниже, чем в годы

авторской проверки (на 4,4 %), но на 16,7 % выше оправдываемости прогнозов по модели 4 (табл. 2).

Таблица 2

**Оправдываемость прогнозов урожайности многолетних трав  
по Кемеровской области**

| Культура                           |                                   | № прогностической модели | Оправдываемость                 |                                        |                               | Средняя оправдываемость, % |                   |
|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------|
|                                    |                                   |                          | авторские испытания (2009–2011) | производственные испытания (2012–2015) | средняя за период (2009–2015) | инерционные                | климатологические |
| Многолетние травы на сено          | предварительный прогноз, 1–2 июня | 1                        | 92,2                            | 88,4                                   | 90,1                          | 88,9                       | 84,7              |
|                                    |                                   | 2                        | 91,1                            | 75,2                                   | 82,0                          | 88,9                       |                   |
|                                    | уточненный прогноз, 1–2 июля      | 3                        | 94,4                            | 90,0                                   | 91,9                          | 88,9                       | 84,7              |
|                                    |                                   | 4                        | 89,7                            | 73,3                                   | 80,3                          | 88,9                       |                   |
| Многолетние травы на зеленую массу | предварительный прогноз, 1–2 июня | 1                        | 94,1                            | 73,0                                   | 82,1                          |                            | 28,3              |
|                                    |                                   | 2                        | 94,1                            | 68,8                                   | 79,7                          |                            |                   |
|                                    | уточненный прогноз, 1–2 июля      | 3                        | 94,5                            | 79,5                                   | 85,9                          | 68,3                       | 20,8*             |
|                                    |                                   | 4                        | 94,6                            | 64,6                                   | 77,5                          | 68,3                       |                   |

*Примечание.* \* – Оправдываемость по методу Г.А. Моисеевой

В среднем за весь период испытаний оправдываемость предварительных методических прогнозов урожайности многолетних трав на сено (на срок 1–2 июня) по модели 1 составила 90,1 %, что на 8,1 % выше, чем по модели 2, и на 1,2–5,4 % выше оправдываемости инерционных и климатологических прогнозов. Успешность уточненных методических прогнозов, составленных по модели 3, за все годы испытаний оказалась также выше, чем рассчитанных по модели 4,

и оправдываемость составила 91,9 %, что на 3,0–7,2 % выше оправдываемости инерционных и климатологических прогнозов (табл. 2).

Методические прогнозы урожайности многолетних трав на зеленую массу по Кемеровской области в период оперативной проверки оправдались несколько хуже, чем в годы авторских испытаний. В первый срок оправдываемость моделей 1 и 2 оказалась ниже на 21,1–25,3 %, во второй срок по моделям 3 и 4 – на 15,0–30,0 %. Хуже сработали модели 2 и 4, средняя оправдываемость методических прогнозов за годы производственных испытаний (2012–2015 гг.) составила 68,8 и 64,6 % соответственно, что ниже порога качества агрометеорологических прогнозов.

В среднем за весь период испытаний с 2009 по 2015 г. оправдываемость предварительных методических прогнозов урожайности многолетних трав на зеленую массу (на срок 1–2 июня) по модели 1 составила 82,1 %, уточненных (на срок 1–2 июля) по модели 3 – 85,9 %, что существенно превышает оправдываемость используемого в оперативной практике Кемеровского ЦГМС метода прогноза урожайности многолетних трав на зеленую массу (автор – Г.А. Моисеева). Оправдываемость существующего в оперативной практике Кемеровского ЦГМС метода прогноза урожайности многолетних трав на зеленую массу 28,3 % на первый срок и 20,8 % на второй срок.

Решением Технического совета ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» от 27 апреля 2016 г. и ЦМКП от 27 мая 2016 г. рекомендованы к внедрению с 1 июня 2016 г. в оперативную практику агрометеорологов отдела гидрометеорологического обеспечения Кемеровского ЦГМС – филиала ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» «Методы прогноза урожайности многолетних трав на сено и зеленую массу по Кемеровской области» в качестве основного на сроки 1–2 июня и 1–2 июля (для многолетних трав на сено и зеленую массу – модели 1 и 3).

### **Результаты испытаний по Алтайскому краю**

По результатам авторской проверки (2009–2011 гг.) методические прогнозы урожайности однолетних и многолетних трав по Алтайскому краю по всем моделям имели высокий результат – средняя оправдываемость составила 81,1–96,0 %. При оперативных испытаниях разработанные модели также показали хороший результат.

В среднем за весь период испытаний с 2009 по 2015 г. оправдываемость предварительных методических прогнозов урожайности многолетних трав на сено по Алтайскому краю (на срок 1–2 июня) по моделям 1 и 2 составила 81,5 и 79,9 %, уточненных (на срок 1–2 июля) по моделям 3 и 4 – 86,5 и 84,6 % соответственно, что значительно выше оправдываемости используемого в оперативной практике Алтайского ЦГМС метода прогноза урожайности сена многолетних трав (табл. 3).

Таблица 3

**Оправдываемость прогнозов урожайности однолетних  
и многолетних трав по Алтайскому краю**

| Культура                                   |                                         | №<br>прогностической модели | Оправдываемость                       |                                           |                                  | Средняя оправдываемость, % |                   |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------|-------------------|
|                                            |                                         |                             | авторские<br>испытания<br>(2009–2011) | производственные<br>испытания (2012–2015) | средняя за период<br>(2009–2015) | инерционные                | климатологические |
| Многолетние<br>травы<br>на сено            | предварительный<br>прогноз,<br>1–2 июня | 1                           | 83,3                                  | 80,2                                      | 81,5                             |                            | 21,1*             |
|                                            |                                         | 2                           | 82,2                                  | 78,2                                      | 79,9                             |                            |                   |
|                                            | уточненный<br>прогноз,<br>1–2 июля      | 3                           | 83,1                                  | 89,1                                      | 86,5                             | 88,9                       | 20,6*             |
|                                            |                                         | 4                           | 81,1                                  | 87,3                                      | 84,6                             | 88,9                       |                   |
| Однолетние<br>травы<br>на зеленую<br>массу | предварительный<br>прогноз,<br>1–2 июня | 1                           | 89,6                                  | 74,5                                      | 81,0                             | 74,3                       | 79,6              |
|                                            |                                         | 2                           | 87,0                                  | 83,9                                      | 85,2                             | 74,3                       |                   |
|                                            | уточненный<br>прогноз,<br>1–2 июля      | 3                           | 91,1                                  | 90,7                                      | 90,9                             | 74,3                       | 79,6              |
|                                            |                                         | 4                           | 96,0                                  | 86,0                                      | 90,3                             | 74,3                       |                   |

*Примечание.* \* – Оправдываемость по методу Э.Г. Рудычевой

Оправдываемость методических прогнозов урожайности однолетних трав на зеленую массу за все годы испытаний составила: на первый

срок 81,0–85,2 %, на второй срок 90,3–90,9 %, что выше оправдываемости инерционных прогнозов на 6,7–16,6 % и климатологических – на 1,4–11,3 % (табл. 3).

Решением Технического совета ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» от 27 апреля 2016 г. и ЦМКП от 27 мая 2016 г. рекомендованы к внедрению с 1 июня 2016 г. в оперативную практику отдела агрометеорологии и агрометпрогнозов Алтайского ЦГМС – филиала ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» «Методы прогноза урожайности многолетних трав на сено и однолетних трав на зеленую массу по Алтайскому краю» в качестве основного на сроки 1–2 июня и 1–2 июля (для многолетних трав на сено – модели 1 и 3, для однолетних трав на зеленую массу – модели 2 и 3).

### Список литературы

1. Гулинова Н.В. Погода и урожай сеяных и луговых трав. – Л.: Гидрометеоиздат, 1982. – 176 с.
2. Селянинов Г.Т. О сельскохозяйственной оценке климата // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. – 1928. – Вып. 20. – С. 169–178.
3. Старостина Т.В. Влияние агрометеорологических условий на формирование зеленой массы и семян многолетних сеяных трав в Свердловской, Челябинской и Курганской областях // Труды ЗапСибНИГМИ. – 1990. – Вып. 91. – С. 69–75.
4. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 150 с.

*С.В. Клячкин, Р.Б. Гузенко, Р.И. Май*

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ МЕТОДА СРЕДНЕСРОЧНОГО ЧИСЛЕННОГО ПРОГНОЗА ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ ДЛЯ ЛЕТНЕГО И ЗИМНЕГО ПЕРИОДОВ В БАРЕНЦЕВОМ И КАРСКОМ МОРЯХ ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТЬЮ 1–7 СУТОК**

### **Введение**

Анализ результатов ледовых прогнозов, выполненных в последние годы по модели распределения льдов в Баренцевом и Карском морях, показал, что модель, положенная в основу прогностической методики, качественно воспроизводит прогностические характеристики ледяного покрова и может применяться для составления среднесрочных численных прогнозов [3]. Созданная модель имеет возможности для внесения модификаций, позволяющих повысить качество прогнозов. В первую очередь это относится к прогнозам молодых льдов, которые имеют относительно низкую достоверность в любом регионе, будь то Охотское, Лаптевых, Баренцево, Карское моря. С нашей точки зрения, замена упрощенной баротропной модели океана на трехмерную бароклинную модель позволит устранить неточности прогнозирования параметров молодых льдов, которые наиболее чувствительны к изменениям термохалинной структуры и динамики моря. Замена океанского блока модели сопряжена с необходимостью согласования граничных условий между моделями льда и океана, заданием новых начальных условий и подбора временных шагов численного интегрирования двух блоков модели.

В первой половине 2016 г. эта работа по модернизации методики была завершена, и во второй половине 2016 г. была проведена серия испытаний с новым океанским блоком.

## 1. Физико-математические основы модели

В качестве океанского блока используется модель Принстонского университета (Princeton Ocean Model, модель POM) [11, 14]. В модели POM используется сетка «С» по классификации Аракавы для аппроксимации пространственных производных конечно-разностными аналогами. Система уравнений движения и неразрывности реализована в так называемых сигма-координатах, где вертикальная дискретизация выполнена не для горизонтов с фиксированной толщиной, а для заданного количества слоев, причем толщина слоев у поверхности и у дна уменьшается по логарифмическому закону. В модели POM для оптимизации расчета модели на компьютере разделены вертикально интегрированные уравнения (двумерный модуль) и уравнения вертикальной структуры (трехмерный модуль). Модель POM содержит полные уравнения термодинамики и уравнения расчета параметров турбулентности по модели Мелора–Ямады [15].

На открытой границе модели для баротропного модуля используются следующие граничные условия, приведенные в работе [6]:

$$\vec{V}_{bc} = \vec{V}_t \pm \sqrt{\frac{g}{H}}(\zeta - h_t); \quad (1)$$

где  $V_{bc}$  – вертикально осредненные течения, устанавливающиеся на открытой границе;  $V_t$  и  $h_t$  – заданные течения и уровень на открытой границе;  $\zeta$  – воссозданный моделью уровень на открытой границе;  $g$  – ускорение свободного падения;  $H$  – глубина места. Переменные  $V_t$  и  $h_t$  представляют собой функции расхода воды и приливные явления, предвычисленные по гармоническим постоянным главных приливных волн ( $M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1$ ). Вычисление приливов проводится по основной формуле [12], гармонические постоянные берутся из работы [16]. В качестве вынуждающей силы на поверхности задавались компоненты тангенциального напряжения и изменение атмосферного давления. При наличии льда тангенциальное напряжение на границе «вода–лед» определяется относительной скоростью дрейфа.

При отсутствии льда потоки массы воды через поверхность определяются только как испарение. При наличии льда через границу

«вода—лед» происходит либо сток солей (при ледообразовании), либо пресной воды (при таянии).

Ледовый блок описываемой модели используется довольно давно и в целом показал вполне адекватные результаты [3]. Термическая эволюция ледяного покрова основывается на уравнении теплового баланса двухслойной среды «лед—снег»:

$$k\rho_{\text{л}} \frac{\partial H}{\partial t} = \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} = \lambda_{\text{л}} \frac{\partial T_{\text{л}}}{\partial z} - Q_w ; \quad (1)$$

где  $H$  — толщина льда;  $\lambda_{\text{л}}$ ,  $\lambda_s$  — теплопроводность льда и снега соответственно;  $Q_w$  — поток тепла от воды к нижней поверхности льда;  $T_{\text{л}}$ ,  $T_s$  — температура льда и снега соответственно;  $k$  — удельная теплота плавления льда;  $\rho_{\text{л}}$  — плотность льда.

В период нарастания толщины льда система (2) решается аналитически при следующих допущениях [7]:

- вертикальные профили температуры льда и температуры снега в период ледообразования считаются линейными;
- потоки тепла через лед и через снег считаются одинаковыми;
- толщина снега определяется по толщине льда с помощью эмпирических соотношений.

Поток солей, обусловленный ледообразованием, описывается выражением:

$$F_s = S_{\text{л}} \rho_{\text{л}} \frac{dH}{dt} , \quad (3)$$

где  $S_{\text{л}}$  — соленость льда;  $\frac{dH}{dt}$  — скорость нарастания толщины льда.

Соленость льда определяется по формуле [9]:

$$S_{\text{л}} = S_w \frac{7\sqrt{\frac{dH}{dt}} K_{\text{л}}}{7\sqrt{\frac{dH}{dt}} + 10,3} , \quad (4)$$

где  $S_w$  — соленость воды на поверхности;  $K_{\text{л}}$  — эмпирический коэффициент, учитывающий стекание рассола. В выражении (4) скорость нарастания толщины льда численно выражается в единицах мм/ч.

Температура верхней поверхности снега оценивается по уравнению теплового баланса. Эта задача подробно рассмотрена в [1], и расчетная формула имеет вид:

$$T_s = (H/\lambda_{\text{л}} + h_s/\lambda_s)F_a + \Theta, \quad (5)$$

где  $\Theta$  — температура замерзания воды;  $F_a$  — поток тепла на границе снег — воздух.

В период таяния ледяного покрова толщина льда рассчитывается также на основе уравнения теплового баланса. При этом учитывается наличие снега на льду, а также изменение альбеда снежно-ледяного покрова в процессе таяния. При необходимости можно рассчитать не просто снижение толщины льда, но также изменение локальной пространственной неоднородности толщины за счет влияния снежиц. Сток пресной воды в море определяется толщиной слоя растаявшего льда.

Динамика ледяного покрова прогнозируется на основе уравнения баланса количества движения в нестационарной постановке:

$$M_{\text{л}} \frac{\partial \vec{W}}{\partial t} = \vec{\tau}_a + \vec{\tau}_w + \vec{F}_c + \vec{F}_g + \vec{F}_p, \quad (6)$$

где  $W$  — скорость дрейфа льда;  $M_{\text{л}}$  — масса льда в столбике единичной площади;  $\tau_a$ ,  $\tau_w$  — касательные напряжения на верхней и нижней поверхностях льда;  $F_c$  — сила Кориолиса;  $F_g$  — сила, обусловленная наклоном уровня;  $F_p$  — сила внутреннего взаимодействия в ледяном покрове.

Тангенциальное напряжение на верхней поверхности льда определяется через составляющие приземного ветра [2]:

$$\tau_{ax} = c_a \rho_a V_x |V_x|, \quad \tau_{ay} = c_a \rho_a V_y |V_y|, \quad (7)$$

где  $c_a$  — коэффициент трения на границе лед—воздух, меняющийся от  $1,5 \cdot 10^{-3}$  до  $5 \cdot 10^{-3}$  в зависимости от торосистости;  $\rho_a$  — плотность воздуха;  $V_x$ ,  $V_y$  — составляющие скорости ветра.

Тангенциальное напряжение на нижней границе ледяного покрова определяется относительной скоростью дрейфа льда [2]:

$$\tau_{wx} = c_w \rho_w (U_x - W_x) |U_x - W_x|; \quad \tau_{wy} = c_w \rho_w (U_y - W_y) |U_y - W_y|, \quad (8)$$

где  $c_w$  — коэффициент трения на границе лед–вода, меняющийся от  $5 \cdot 10^{-2}$  до  $25 \cdot 10^{-2}$  также в зависимости от торосистости;  $U_x, U_y$  — компоненты скорости подледного течения.

Сила Кориолиса и проекция силы тяжести на поверхность моря задаются традиционно.

Форма записи слагаемого, описывающего внутренне взаимодействие в ледяном покрове, определяется принятой реологической моделью. В данной модели считается, что ледяной покров проявляет свойства, характерные для вязко-пластических сред.

Вязкое взаимодействие в ледяном покрове подробно рассмотрено в [1]. Согласно этой работе, сила внутреннего взаимодействия пропорциональна дивергенции внутренних напряжений. Внутренние напряжения  $\sigma_{\xi\xi}, \sigma_{\chi\chi}$ , соответствующие главным осям тензора скоростей деформаций, рассчитываются по формуле:

$$\sigma_{\xi\xi} = K \varepsilon_{\xi\xi}, \quad \sigma_{\chi\chi} = K \varepsilon_{\chi\chi}. \quad (9)$$

Параметр  $K$  определяется следующим образом:

1)  $K = K_0 H(3C - 2)$  при выполнении каждого из всех следующих условий:

$$C \geq 0,67, \quad \text{div} W \leq 0, \quad \varepsilon_{\xi\xi} < 0, \quad \varepsilon_{\chi\chi} < 0; \quad (10)$$

2)  $K = 0$  при невыполнении хотя бы одного из условий (10).

Здесь:  $K_0 = 10^{10} \text{ кг } \text{с}^{-1} \text{ м}^{-2}$ ;  $\varepsilon_{\xi\xi}$  и  $\varepsilon_{\chi\chi}$  — инварианты тензора скоростей деформаций, соответствующие осям  $\xi, \chi$  эллипса деформаций;  $C$  — сплоченность льда;  $W$  — скорость дрейфа.

Отличительной особенностью деформирования пластических сред является наличие порогового механизма, т. е. среда деформируется при достаточно больших внешних нагрузках. Если напряжения, возникающие в ледяном покрове под влиянием пространственной неоднородности дрейфа, превышают некоторый предел, то это может привести к торошению. В данном случае этот предел оценивается как устойчивость ледяной пластины, лежащей на упругом основании, по отношению к продольному изгибу [10]:

$$F_{\text{lim}} = \sqrt{\frac{\rho_w g E H}{12(1 - \mu^2)}}, \quad (11)$$

где  $g$  — ускорение силы тяжести;  $E$  — модуль Юнга;  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

В том случае, если в данной ячейке происходит торошение, то это означает накопление «лишнего» объема льда, т. е. свыше 10 баллов (это своего рода аналог пластического течения). Если напряжение недостаточно, то чтобы накопления лишнего объема не происходило, применяется специальный искусственный прием, заключающийся в итеративной коррекции поля дрейфа в соответствии с условием:

$$\operatorname{div} W \geq 0 ; \quad (12)$$

Описанный принцип по существу имитирует пластическое поведение ледяного покрова.

На твердой границе при нажимном дрейфе нормальная к берегу компонента равна нулю, касательная компонента дрейфа трансформируется в зависимости от угла между направлением дрейфа и направлением береговой черты. На жидкой границе напряжения равны нулю. На границах расчетной области при дрейфе, направленном внутрь расчетной области, градиенты сплоченности (общей и частной) и скорости равны нулю; при выносном дрейфе градиенты сплоченности и скорости на границе равны соответствующим градиентам в ближайшей внутренней ячейке.

## 2. Численная реализация модели

Численная схема модели построена на основе регулярной сетки с шагом 25 км (рис. 1), временной шаг составляет:

- в океанском блоке для баротропного модуля — 5 секунд, для бароклинного — 2,5 минуты;

- в ледовом блоке для расчета динамики — 10 минут, для расчета термики — 3 часа.

Ледяной покров представлен набором маркеров, каждый из которых характеризуется пространственными координатами в декартовой системе, толщиной, торосистостью и скоростью. Термическое нарастание толщины рассчитывается отдельно для каждого маркера. В случае появления молодого льда добавляются новые маркеры. Расчет перемещения маркеров льда основан на лагранжевском методе. Для каждого маркера определяется скорость и перемещение через каждые 10 минут:

$$x = x_0 + W_x \Delta t, \quad y = y_0 + W_y \Delta t. \quad (13)$$

где  $x_0, y_0$  — декартовы координаты маркера в начальный момент времени.

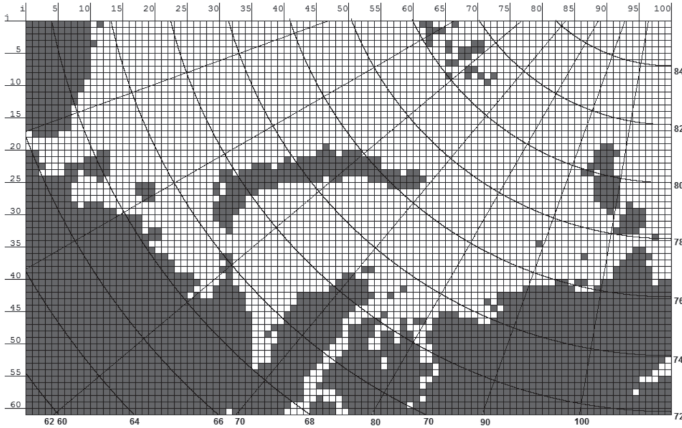


Рис. 1. Схема сеточной области модели.

В начальный момент времени маркеры считаются неподвижными. Зная общее количество маркеров в данной ячейке, а также распределение маркеров по толщинам, элементарно определяются общая и частная сплоченности льда в этой ячейке:

$$C_{tot} = \frac{N_{tot}}{N_{max}}; \quad C_{pi} = \frac{N_{pi}}{N_{max}}, \quad (14)$$

где  $C_{tot}$  — общая сплоченность льда;  $N_{tot}$  — общее количество маркеров;  $N_{max}$  — максимально возможное количество маркеров;  $C_{pi}$  — частная сплоченность  $i$ -ой возрастной градации;  $N_{pi}$  — количество маркеров, толщина которых соответствует  $i$ -ой возрастной градации.

Понятно, что при этом автоматически выполняются условия:

$$N_{tot} = \sum_{i=1}^m N_{pi}; \quad C_{tot} = \sum_{i=1}^m C_{pi}; \quad (15)$$

где  $m$  — количество возрастных градаций, принятых в данной модели.

Толщина льда  $i$ -ой возрастной градации определяется по формуле:

$$H_i = \frac{1}{N_{pi}} \sum_{j=1}^{N_{pi}} H_{ij} ; \quad (16)$$

где  $H_{ij}$  — толщина  $j$ -го маркера, соответствующего  $i$ -ой возрастной градации.

Максимально возможное количество маркеров может в принципе быть любым, так как маркеры — это условные льдины, имеющие единичную площадь. В настоящей версии модели  $N_{\max}$  равно 40. В более ранних версиях  $N_{\max}$  принималось равным 20, однако это нередко приводило к неоправданным флуктуациям сплоченности льда, необусловленным ни термикой (замерзание/таяние), ни динамикой (дивергенция/конвергенция). Увеличение максимально возможного количества маркеров в ячейке позволило существенно купировать этот нежелательный эффект.

Количество возрастных градаций (и, соответственно, градаций толщины льда) формально также может быть любым, но предпочтительно, чтобы эти градации соответствовали номенклатуре морских льдов. В этом случае  $m=8$  (нилас, серый, серо-белый, однолетний тонкий, однолетний средний, однолетний толстый, двухлетний и многолетний). В условиях Арктики, где диапазон толщин вообще широк, точное определение возраста льдов толщиной до 30 см не столь важно, поэтому первые три возрастные градации — нилас, серый и серо-белый можно объединить в одну общую возрастную градацию, именуемую «молодой лед». Тогда количество возрастных градаций снижается до 6.

Силы внутреннего взаимодействия, возникающие при дрейфе, определяются в соответствии с эйлеровским подходом и считаются одинаковыми в пределах ячейки. Вытораскиваемые маркеры исключаются из дальнейшего расчета, а их суммарная толщина равномерно распределяется среди оставшихся маркеров данной ячейки как прибавка толщины за счет торосов. Использование метода маркеров позволяет автоматически выполнять условие сохранения массы и полностью исключить проблемы, связанные с вычислительной вязкостью.

Перед выполнением собственно прогностического расчета осуществляется «разгон» океана, продолжительность которого составляет несколько суток.

### **3. Технологическая реализация модели**

Большая часть программного обеспечения методики написана на алгоритмическом языке FORTRAN, некоторые операции — на встроенном языке ArcGIS 10.2.

#### **3.1. Подготовка исходных ледовых данных**

##### **3.1.1. Составление ледовых карт**

Главным источником первичных фактических данных по ледяному покрову в настоящее время являются спутниковые снимки в различных спектральных диапазонах и с различной разрешающей способностью. Ледовые карты, основанные на спутниковых снимках, составляются в ФГБУ «АНИИ» с 70-х годов XX века (в электронном виде — с 2000 года).

Ледовые карты бывают двух основных типов: обзорные и детализированные.

Обзорные карты Арктики составляются регулярно один раз в неделю путем комплексирования нескольких спутниковых снимков за 1–2 суток, освещают большие акватории (по существу — весь Северный Ледовитый океан), и не имеют «белых пятен», т. е. зон отсутствия информации.

Детализированные карты составляются нерегулярно, а для обеспечения определенной морской операции — по заказу конкретного потребителя. В основе детализированной карты лежит один снимок, т. е. детализированная карта отражает фактические ледовые условия «в чистом виде». Однако такие карты освещают гораздо меньшие пространства (например, прикромочная область, подходы к какому-нибудь важному с навигационной точки зрения проливу и т. п.) и зачастую имеют пробелы, связанные с облачностью, техническими дефектами снимка и т. п.

##### **3.1.2. Преобразование ледовой информации из формата источника в формат прогностической модели**

Преобразование ледовой информации из формата ледовой карты в формат численной модели может выполняться двумя способами.

*Основной способ.* Ледовая карта представляется в виде векторного шейп-файла, содержащего информацию о границах ледовых зон и о возрастном составе (частной сплоченности) льда в каждой зоне. В этом

случае специальная программа, работающая в среде ГИС ArcMap, сопоставляет координаты границ ледовых зон с координатами ячеек расчетной сетки модели и формирует цифровой файл-матрицу в формате ASCII, содержащий информацию о характеристиках ледяного покрова по каждой ячейке сетки.

Отметим, что ледовые карты в формате «шейп-файл» не содержат информации о толщине, торосистости и разрушенности льда в явном виде. Этот пробел может восполняться несколькими способами:

— в зимний период толщина льда каждой возрастной градации принимается равной середине стандартного диапазона толщины данной возрастной градации. Например, для однолетнего тонкого льда диапазон толщин — от 30 до 70 см; соответственно, толщина однолетнего тонкого льда принимается равной середине диапазона, т. е. 50 см;

— в летний период толщина льда в данной точке может рассчитываться с помощью эмпирической формулы, аргументами которой являются климатическая толщина льда в данной точке в момент сезонного максимума, время, прошедшее после начала таяния, сплоченность льда в данной точке;

— толщина, торосистость и разрушенность льда данной возрастной градации в данной точке берутся из результатов предшествующего расчета (прогноза).

*Запасной способ.* Ледовая карта представлена в виде твердой копии или в растровом графическом формате. В этом случае используется специальный графический редактор, позволяющий в интерактивном режиме воспроизводить на экране монитора ледовую карту (т. е. границы однородных ледовых зон) и вводить характеристики ледяного покрова по каждой зоне. При этом, опираясь на какие-либо дополнительные источники информации (данные полярных станций, донесения с проходящих судов, экспертные знания о режимных особенностях региона), можно в явном виде указать толщину, торосистость и разрушенность льда. Затем программа также сопоставляет координаты границ ледовых зон с координатами ячеек расчетной сетки модели и формирует цифровой файл-матрицу в формате ASCII, содержащий информацию о характеристиках ледяного покрова по каждой ячейке сетки.

Первый (основной) способ позволяет существенно повысить точность и экономить затраты времени и труда. Однако, как показал опыт, второй (запасной) способ по тем или иным причинам также нередко бывает востребован.

### **3.1.3. Комплексирование разнородной исходной ледовой информации и формирование окончательных вариантов массивов исходных ледовых данных в формате прогностической численной модели**

В случае, когда на фактической ледовой карте есть зоны, по которым данные отсутствуют, такие пробелы восполняются из результатов предыдущего прогноза. Предыдущий прогноз подбирается автоматически из архива, причем он должен иметь минимальную заблаговременность и наилучшее соответствие по времени новому снимку. В результате комплексирования новой фактической информации и результатов предыдущего прогноза формируется электронная композитная ледовая карта в формате численной модели. При комплексировании данные нового снимка имеют безусловный приоритет. На рис. 2. иллюстрируется принцип построения композитной ледовой карты.

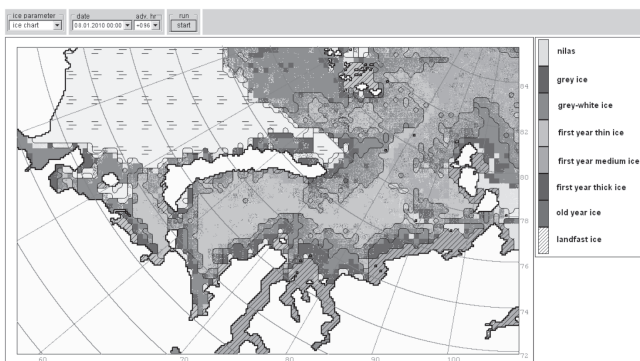
### **3.2. Подготовка гидрологических данных**

Подготовка гидрологических данных заключается в коррекции среднего климатического поля температуры воды в соответствии с фактическим распределением ледяного покрова.

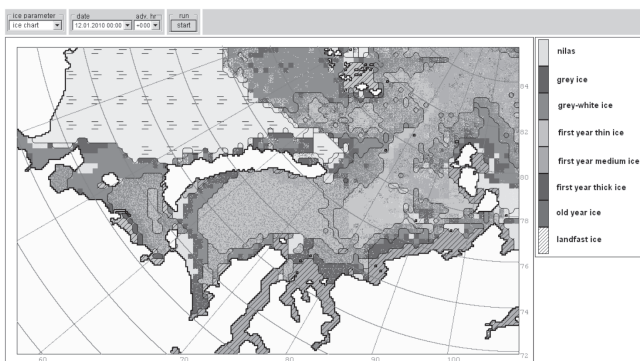
В качестве нулевого приближения исходных данных по термохалинной структуре моря используются средние сезонные (месячные) поля температуры и солёности воды на стандартных горизонтах [13, 17]. Для получения соответствия между полем температуры воды и фактическим распределением ледяного покрова на момент составления прогноза применяется специально разработанная автоматическая процедура коррекции. В результате действия этой процедуры пересчитываются значения температуры воды в пределах верхнего квазиоднородного слоя, а затем в каждой ячейке сетки проверяется условие вертикальной устойчивости. Результирующие поля температуры и солёности записываются в матричный файл в формате ASCII. На рис. 3. показан пример распределения температуры воды до (слева) и после (справа) применения коррекции в регионе Баренцево — Карское моря.



**a)**

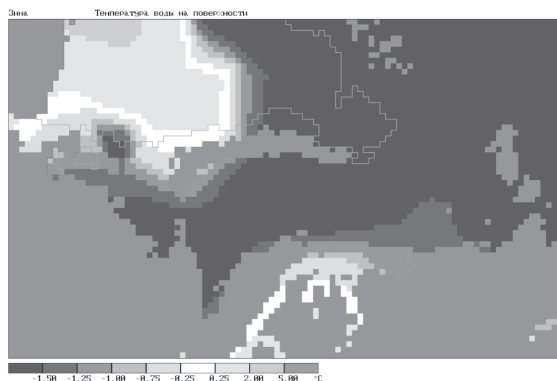


**б)**

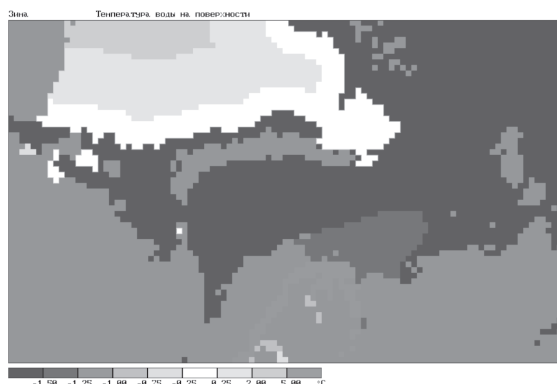


**в)**

**Рис. 2. Принцип построения композитной ледовой карты: карта, полученная по новому снимку (а); предыдущий прогноз (б); композитная карта (в).**



а)



б)

**Рис. 3. Температура поверхности моря до коррекции (а) и после коррекции (б).**

### **3.3. Подготовка метеорологических данных**

В качестве данных метеорологического форсинга при составлении прогнозов используются результаты глобальной модели атмосферы Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП).

Эти данные находятся в свободном доступе в системе АСПД и представляют собой бинарные матрицы прогностических полей приземной и высотной температуры воздуха и атмосферного давления на уровне моря в регулярной сферической сетке с шагом  $2,5^\circ$ , временной дискретностью 12 часов и заблаговременностью 168 часов.

Подготовка метеорологических данных заключается в преобразовании прогностических полей из формата глобальной модели атмосферы в формат прогностической численной модели ледяного покрова (матрицы в кодировке ASCII). Эта процедура выполняется автоматически с помощью специальной программы.

### **3.4. Запись и представление результатов**

Результаты расчетов записываются в виде набора цифровых матричных файлов в формате ASCII, где каждый элемент данной матрицы характеризует значение данного ледового параметра в данной ячейке сетки. Понятно, что количество матриц равно количеству прогнозируемых параметров ледяного покрова.

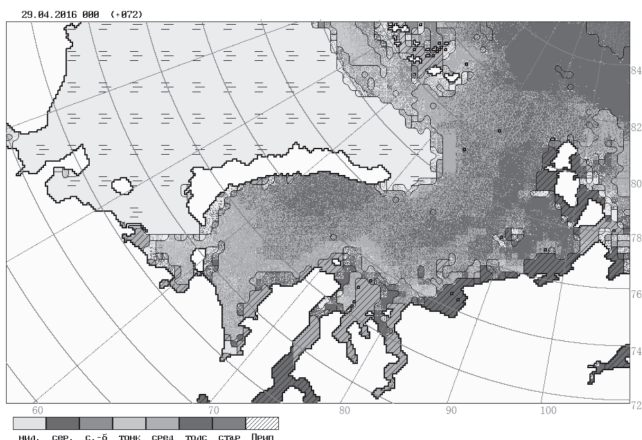
В рамках существующей версии прогностической методики предусмотрены три основных варианта представления результатов прогноза потребителю.

*Вариант 1.* Визуализация результатов осуществляется непосредственно на рабочем месте прогнозиста в виде карт-схем (программы, выполняющие визуализацию, написаны на языке FORTRAN). Такая визуализация применяется, главным образом, для быстрого визуального контроля результатов на предмет наличия грубых ошибок. Карта-схема, построенная на экране монитора прогнозиста, может сохраняться в виде растрового графического файла и передаваться потребителю как окончательная форма прогностической продукции. Примеры таких карт-схем с прогностическими полями общего распределения льда в зимний и летний периоды приводятся на рис. 4 и 5.

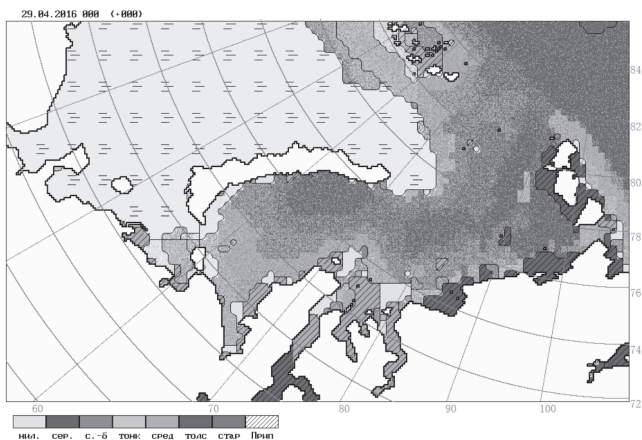
*Вариант 2.* Прогностические матрицы в формате численной модели преобразуются в векторный формат (шейп-файл), совместимый с современными ГИС. Процедура преобразования состоит из двух стадий:

- ячейки сетки со схожими характеристиками ледяного покрова объединяются в однородные ледовые зоны (ОЛЗ), в результате чего формируется ASCII файл, содержащий список ОЛЗ и список ячеек сетки, входящих в каждую ОЛЗ;

- отталкиваясь от списка ОЛЗ, формируется шейп-файл в формате ГИС, построенный в соответствии с международным стандартом SIGRID-3 [8].



а)

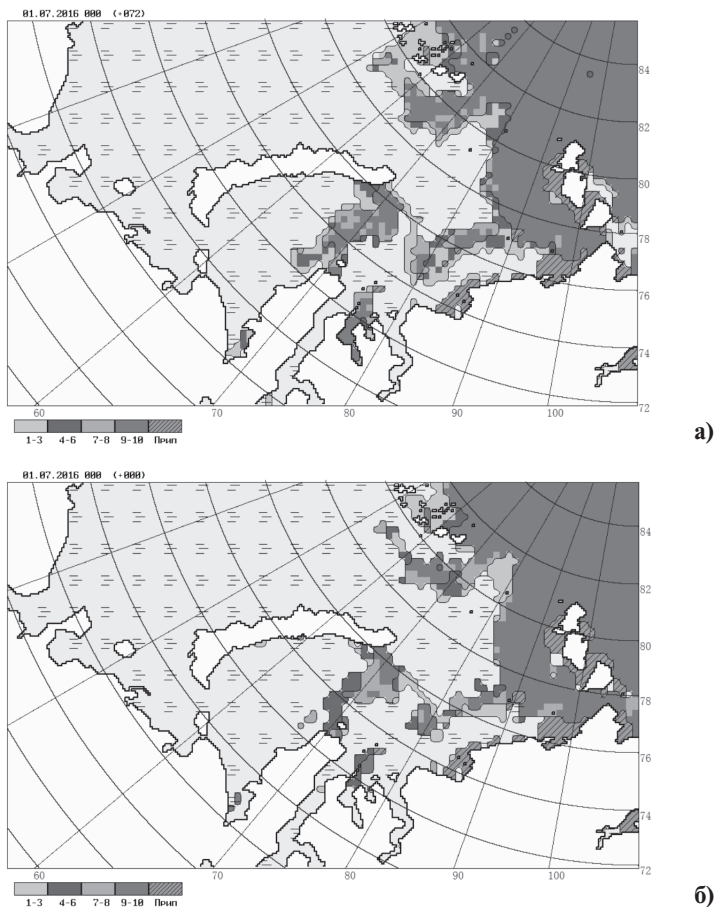


б)

**Рис. 4. Пример прогноза общего распределения льда в зимний период: прогностическое распределение 29.04.2016 (прогноз от 26.04.2016 +72 часа) (а); фактическое распределение 29.04.2016 (б).**

*Вариант 3.* Прогностический файл в формате ГИС (шейп-файл) преобразуется в формат, совместимый с какой-нибудь электронной навигационно-картографической системой. В частности, в настоящее время в ФГБУ «ААНИИ» широко практикуется представление ледовой

информации с помощью систем de-Kart Navigator и NaviSailor. Эти системы позволяют одновременно визуализировать ледовую (как фактическую, так и прогностическую), метеорологическую и навигационную информацию в виде отдельных (при необходимости – прозрачных) слоев.



**Рис. 5. Пример прогноза общего распределения льда в летний период: прогностическое распределение 01.07.2016 (прогноз от 29.06.2016 +72 часа) (а); фактическое распределение 01.07.2016 г. (б).**

#### 4. Методика оценки достоверности прогнозов

Для оценки качества ледовых прогнозов (расчетов) используются две основных меры – функция распределения ошибок прогнозов (1) и сочетание оправдываемости и эффективности (2).

Статистическое распределение ошибок прогнозов (расчетов) оценивается по значениям ошибки  $\Delta_i$  в каждой ячейке сетки:

$$\Delta_i = e_{ci} - e_{ai} ; \quad (17)$$

где  $e_{ci}$  – расчетное (прогностическое) значение элемента в  $i$ -ой ячейке,  $e_{ai}$  – фактическое значение элемента в  $i$ -ой ячейке. Этот подход позволяет оценить порядок величины ошибок (оценка математического ожидания распределения) в целом, наличие систематической ошибки (асимметрия распределения).

Вторая мера – оправдываемость и эффективность – основана на определении, оправдался или не оправдался прогноз (расчет) в каждой ячейке сетки. В этом случае основой для оценки прогноза (расчета) является величина оправдываемости в  $i$ -ой ячейке  $O_i$ , которая определяется как

$$O_i = 1 \text{ при } \Delta_i \leq \Delta_u, \quad O_i = 0 \text{ при } \Delta_i > \Delta_u . \quad (18)$$

где  $\Delta_u$  – значение предельно допустимой ошибки.

Предельно допустимая ошибка определяется следующим образом [5]:

$$\Delta_u = 0,68\sigma(e) ; \quad (19)$$

где  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение естественной изменчивости исследуемого элемента  $e$ , причем изменчивость оценивается во временных масштабах, соответствующих заблаговременности прогноза (расчета). Также в качестве оценки предельно допустимой ошибки прогноза сплоченности (как общей, так и частной) можно использовать стандартные градации сплоченности [4].

Далее по значениям оправдываемости в отдельных ячейках получают оценки оправдываемости  $P$  и эффективности  $E$  прогноза (расчета) в целом по расчетной области.

Под оправдываемостью понимается величина (в %):

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i \cdot 100 , \quad (20)$$

где  $n$  — количество ячеек сетки, в которых производится сопоставление.

Под эффективностью расчета (прогноза) понимается величина:

$$E = P - P_{inert}, \quad (21)$$

где  $P_{inert}$  — оправдываемость так называемого инерционного прогноза. Инерционный прогноз — это прогноз, полученный на основе допущения, что в течение прогностического срока значение прогнозируемой характеристики не меняется, т. е. «завтра будет то же, что сегодня». Оправдываемость инерционного прогноза получается путем сравнения исходных фактических и конечных фактических значений исследуемого элемента, причем используются те же формальные процедуры, что и при оценке оправдываемости модельного прогноза. Иными словами, эффективность прогноза (расчета) показывает, какое из двух предположений заслуживает большего доверия: «завтра будет то, что обещает прогностическая модель» или «завтра будет то же, что сегодня».

Таким образом, для оценки прогностического метода применяются две характеристики: оправдываемость и эффективность. Чтобы метод был признан удовлетворительным, необходимо, чтобы оправдываемость была достаточно высокой (формально минимальное значение не установлено, но традиционно принимается величина 70–75 %), а эффективность — положительной. Если хотя бы одно из этих условий не выполняется, то данный прогноз считается неудачным. Если серия прогнозов дает в среднем низкую оправдываемость или отрицательную эффективность (или и то, и другое вместе), то прогностический метод в целом следует признать неприемлемым.

Понятно, что при оценках ошибок прогнозов учитывается только та часть расчетной области, по которой имеется как исходная, так и конечная фактическая (контрольная) информация. Когда значительные части расчетной области закрыты облачностью и зоны начальных и контрольных данных не пересекаются, оценить прогноз невозможно.

## 5. Результаты испытаний 2016 года

Испытания численной модели прогноза распределения льдов в Баренцевом и Карском морях заблаговременностью 1–7 суток проводились в 2016 г. в соответствии с решением ЦМКП от 3 декабря 2015 г.

как дополнение к первичным испытаниям, проведенным в ходе работы по проекту ЦНТП 2011–2013 гг. (раздел 1.5.1.4). Основанием для проведения дополнительных испытаний было то обстоятельство, что именно в 2015 г., т. е. в период проведения первичных испытаний со старым упрощенным океанским блоком, была начата работа по освоению и внедрению в модель более адекватного океанского блока, основанного на модели Принстонского университета (модель РОМ).

Ледовые прогнозы составлялись в ретроспективном режиме на основе реальных ледовых карт и реальных прогнозов атмосферного форсинга. В общей сложности было составлено 28 прогнозов, охватывавших период с октября 2015 по ноябрь 2016 года (по два прогноза в месяц). При этом в каждом месяце выбирались случаи самого удачного и самого неудачного прогноза, полученного по старой версии модели (с упрощенным океаном). Заблаговременность прогнозов составляла от 1 до 4 суток.

В табл. 1 приводятся сведения о достоверности этих прогнозов, в табл. 2 – сравнение результатов, полученных по новой версии прогностической модели (с океанским блоком РОМ) с аналогичными результатами за те же даты, полученными по старой версии модели (с упрощенным океанским блоком). На рис. 6 приводится гистограмма распределения ошибок прогнозов общей и частной сплоченности льда.

*Таблица 1*

**Обобщение достоверности прогнозов по результатам испытаний 2015–2016 гг.**

| Год  | Месяц | Дата | Заблаг., сут | Общая спл. |            | Спл. молодого |             | Спл. тонкого |            | Спл. среднего |      | Спл. толстого |      |
|------|-------|------|--------------|------------|------------|---------------|-------------|--------------|------------|---------------|------|---------------|------|
|      |       |      |              | опр.       | эфф.       | опр.          | эфф.        | опр.         | эфф.       | опр.          | эфф. | опр.          | эфф. |
| 2015 | 10    | 16   | 4            | 77,6       | <b>9,8</b> | 78,7          | <b>11,3</b> |              |            |               |      |               |      |
| 2015 | 10    | 27   | 3            | 92,5       | <b>0,2</b> | 92,3          | <b>0,1</b>  | 99,8         | <b>0,2</b> |               |      |               |      |
| 2015 | 11    | 3    | 3            | 91,4       | –4,5       | 91,6          | –3,5        | 99,7         | <b>1,0</b> |               |      |               |      |
| 2015 | 11    | 13   | 4            | 88,9       | –3,5       | 86,4          | –1,3        | 91,8         | <b>6,0</b> |               |      |               |      |
| 2015 | 12    | 7    | 2            | 93,3       | –0,1       | 79,7          | <b>1,5</b>  | 76,5         | <b>6,3</b> | 99,8          | 0,0  |               |      |

Таблица 1 (окончание)

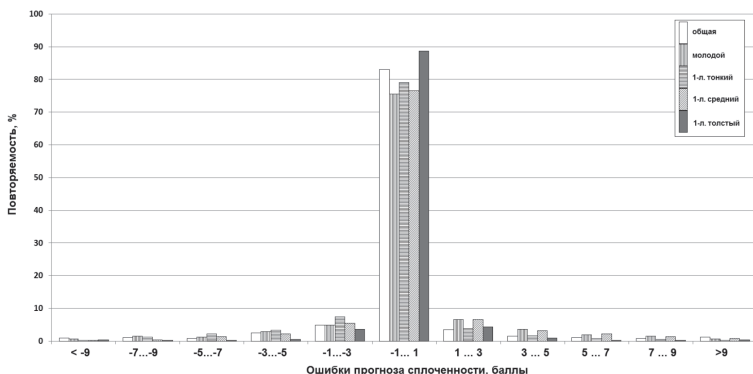
| Год     | Месяц | Дата | Заблаг., сут | Общая спл. |             | Спл. молодого |             | Спл. тонкого |             | Спл. среднего |            | Спл. толстого |            |
|---------|-------|------|--------------|------------|-------------|---------------|-------------|--------------|-------------|---------------|------------|---------------|------------|
|         |       |      |              | опр.       | эфф         | опр.          | эфф.        | опр.         | эфф.        | опр.          | эфф.       | опр.          | эфф.       |
| 2015    | 12    | 28   | 1            | 97,7       | <b>3,6</b>  | 95,2          | <b>5,4</b>  | 94,2         | <b>0,9</b>  | 99,2          | <b>0,7</b> |               |            |
| 2016    | 1     | 12   | 3            | 98,2       | <b>1,6</b>  | 86,6          | -1,4        | 91,7         | <b>2,9</b>  | 99,8          | <b>1,5</b> |               |            |
| 2016    | 1     | 15   | 4            | 95,4       | <b>0,1</b>  | 80,4          | -1,8        | 81,7         | <b>3,7</b>  | 99,1          | <b>0,7</b> |               |            |
| 2016    | 2     | 5    | 4            | 98,3       | <b>0,5</b>  | 84,5          | -3,2        | 77,1         | <b>11,1</b> | 87,6          | <b>7,4</b> |               |            |
| 2016    | 2     | 23   | 3            | 93,0       | -2,9        | 86,2          | -2,4        | 90,1         | <b>7,6</b>  | 98,0          | <b>2,6</b> |               |            |
| 2016    | 3     | 4    | 4            | 91,2       | -3,3        | 84,9          | -3,5        | 91,2         | <b>5,0</b>  | 96,5          | <b>2,3</b> |               |            |
| 2016    | 3     | 11   | 4            | 95,6       | <b>0,8</b>  | 88,4          | -3,2        | 90,7         | <b>2,0</b>  | 95,6          | <b>2,4</b> | 99,9          | <b>0,1</b> |
| 2016    | 4     | 12   | 3            | 94,9       | <b>1,5</b>  | 89,3          | -3,6        | 92,1         | <b>0,7</b>  | 96,1          | <b>2,3</b> | 99,7          | <b>1,6</b> |
| 2016    | 4     | 26   | 3            | 98,3       | <b>0,5</b>  | 96,7          | -0,5        | 97,7         | <b>2,0</b>  | 97,8          | <b>2,6</b> | 98,9          | <b>1,0</b> |
| 2016    | 5     | 3    | 3            | 98,1       | <b>0,5</b>  | 98,9          | <b>1,7</b>  | 98,5         | <b>1,6</b>  | 98,8          | <b>2,9</b> | 98,2          | <b>1,9</b> |
| 2016    | 5     | 27   | 4            | 89,8       | <b>8,8</b>  | 81,6          | -3,7        | 97,7         | <b>2,0</b>  | 85,0          | -1,9       | 88,3          | <b>2,3</b> |
| 2016    | 6     | 7    | 3            | 90,2       | <b>7,7</b>  |               |             |              |             |               |            |               |            |
| 2016    | 6     | 28   | 3            | 92,8       | <b>6,1</b>  |               |             |              |             |               |            |               |            |
| 2016    | 7     | 1    | 4            | 91,9       | <b>7,3</b>  |               |             |              |             |               |            |               |            |
| 2016    | 7     | 15   | 4            | 98,3       | <b>3,7</b>  |               |             |              |             |               |            |               |            |
| 2016    | 8     | 6    | 3            | 80,7       | <b>13,3</b> |               |             |              |             |               |            |               |            |
| 2016    | 8     | 30   | 2            | 98,7       | <b>0,7</b>  |               |             |              |             |               |            |               |            |
| 2016    | 9     | 2    | 4            | 99,6       | 3,1         |               |             |              |             |               |            |               |            |
| 2016    | 9     | 6    | 2            | 99,2       | <b>0,1</b>  |               |             |              |             |               |            |               |            |
| 2016    | 10    | 4    | 3            | 99,7       | <b>0,2</b>  | 99,7          | <b>0,2</b>  |              |             |               |            |               |            |
| 2016    | 10    | 28   | 4            | 89,4       | <b>8,9</b>  | 90,1          | <b>10,2</b> | 99,3         | <b>0,5</b>  |               |            |               |            |
| 2016    | 11    | 1    | 1            | 96,2       | <b>5,6</b>  | 97,2          | <b>6,6</b>  |              |             |               |            |               |            |
| 2016    | 11    | 8    | 2            | 80,8       | <b>0,2</b>  | 79,7          | -0,9        | 95,1         | 0,0         |               |            |               |            |
| Среднее |       |      |              | 93,3       | <b>2,5</b>  | 88,4          | <b>0,4</b>  | 92,1         | <b>3,1</b>  | 96,1          | <b>2,0</b> | 97,0          | <b>1,4</b> |

Таблица 2

**Сопоставление достоверности прогнозов с новым (модель РОМ)  
и старым (упрощенная модель) океанским блоком**

| Год            | Месяц | Дата | Заблаг.,<br>сут | Эффективность |                  |                 |                    |                  |
|----------------|-------|------|-----------------|---------------|------------------|-----------------|--------------------|------------------|
|                |       |      |                 | общая<br>спл. | спл.<br>молодого | спл.<br>тонкого | спл. сред-<br>него | спл.<br>толстого |
| 2015           | 10    | 16   | 4               | –3,5          | –2,3             |                 |                    |                  |
| 2015           | 10    | 27   | 3               | –2,7          | –2,3             | <b>0,6</b>      |                    |                  |
| 2015           | 11    | 3    | 3               | –3,4          | –2,3             | <b>1,3</b>      |                    |                  |
| 2015           | 11    | 13   | 4               | –4,0          | –3,0             | 1,1             |                    |                  |
| 2015           | 12    | 7    | 2               | <b>0,6</b>    | <b>2,2</b>       | –2,0            | 0,0                |                  |
| 2015           | 12    | 28   | 1               | <b>1,6</b>    | <b>2,6</b>       | <b>1,9</b>      | <b>0,4</b>         |                  |
| 2016           | 1     | 12   | 3               | <b>2,2</b>    | –3,0             | <b>1,2</b>      | <b>0,7</b>         |                  |
| 2016           | 1     | 15   | 4               | –1,5          | <b>1,3</b>       | –1,1            | <b>0,4</b>         |                  |
| 2016           | 2     | 5    | 4               | –1,1          | –2,8             | –1,7            | <b>1,3</b>         |                  |
| 2016           | 2     | 23   | 3               | –2,7          | –1,1             | <b>0,3</b>      | <b>1,1</b>         |                  |
| 2016           | 3     | 4    | 4               | –3,3          | –1,9             | –0,2            | <b>1,2</b>         |                  |
| 2016           | 3     | 11   | 4               | –1,7          | –1,6             | –0,9            | <b>1,6</b>         | –0,1             |
| 2016           | 4     | 12   | 3               | –1,2          | <b>0,6</b>       | –1,2            | <b>2,0</b>         | <b>1,0</b>       |
| 2016           | 4     | 26   | 3               | –0,2          | <b>2,7</b>       | <b>1,0</b>      | <b>1,6</b>         | <b>1,0</b>       |
| 2016           | 5     | 3    | 3               | –0,1          | <b>2,9</b>       | <b>0,5</b>      | <b>2,5</b>         | <b>1,3</b>       |
| 2016           | 5     | 27   | 4               | <b>4,1</b>    | <b>3,2</b>       | <b>2,4</b>      | 0,0                | <b>1,8</b>       |
| 2016           | 6     | 7    | 3               | <b>4,4</b>    |                  |                 |                    |                  |
| 2016           | 6     | 28   | 3               | 1,7           |                  |                 |                    |                  |
| 2016           | 7     | 1    | 4               | <b>1,0</b>    |                  |                 |                    |                  |
| 2016           | 7     | 15   | 4               | <b>1,7</b>    |                  |                 |                    |                  |
| 2016           | 8     | 6    | 3               | <b>2,0</b>    |                  |                 |                    |                  |
| 2016           | 8     | 30   | 2               | –0,3          |                  |                 |                    |                  |
| 2016           | 9     | 2    | 4               | <b>1,7</b>    |                  |                 |                    |                  |
| 2016           | 9     | 6    | 2               | –0,5          |                  |                 |                    |                  |
| 2016           | 10    | 4    | 3               | <b>0,1</b>    | <b>0,1</b>       |                 |                    |                  |
| 2016           | 10    | 28   | 4               | <b>2,2</b>    | <b>3,3</b>       | 0,0             |                    |                  |
| 2016           | 11    | 1    | 1               | <b>2,6</b>    | <b>3,6</b>       |                 |                    |                  |
| 2016           | 11    | 8    | 2               | <b>11,9</b>   | <b>11,3</b>      | <b>0,1</b>      |                    |                  |
| <b>Среднее</b> |       |      |                 | <b>0,4</b>    | <b>0,7</b>       | <b>0,2</b>      | <b>1,1</b>         | <b>1,0</b>       |

*Примечание.* Отрицательные величины означают, что «новая» модель дала худшие результаты, положительные — лучшие.



**Рис. 6. Гистограмма распределения ошибок прогнозов общей и частной сплоченности льда.**

Основные выводы, которые можно сделать по результатам, приведенным в табл. 1 и 2 и на рис. 6, сводятся к следующему.

1. В среднем, оправдываемость прогнозов общей сплоченности в зимний период составила 93,0 % при эффективности +1,4% (на 0,1 % хуже, чем по старой модели), в летний — оправдываемость 93,9 %, эффективность 5,3 % (на 1,5 % лучше, чем по старой модели). Оправдываемость прогнозов частной сплоченности составила в среднем 92,1 % при эффективности +1,7 % (на 0,6 % лучше, чем по старой модели).

2. Наиболее удачными были прогнозы частной сплоченности однолетнего среднего льда (оправдываемость 96,1 %, эффективность 2,0 %) и однолетнего толстого льда (оправдываемость 97,0 %, эффективность 1,4 %), наименее удачными — прогнозы молодого льда (оправдываемость 88,4 %, эффективность 0,4 %). Наиболее эффективными оказались прогнозы однолетнего тонкого льда (3,1 %).

3. Большинство ошибок прогнозов (около 80 %) группируется в пределах  $\pm 1$  балл. Гистограмма ошибок не имеет явной асимметрии, т. е. систематическая ошибка отсутствует. Повторяемость грубых ошибок (более 7—9 баллов по абсолютному значению) по общей сплоченности ничтожна, а по частным — несколько более заметна. Это и привело к несколько меньшей оправдываемости прогнозов частной сплоченности.

4. Ошибки прогнозов со знаком «+» и со знаком «—» распределены практически симметрично, т. е. прогностическая методика не содержит заметной систематической ошибки.

5. Увеличение максимально возможного количества маркеров в ячейке с 20 до 40 позволило существенно купировать нежелательный эффект случайных флуктуаций сплоченности льда, особенно в летний период.

6. Сезонный ход достоверности прогнозов показывает, что оправдываемость и эффективность меняются примерно в противофазе: в периоды относительной стабильности оправдываемость растет, а эффективность снижается, в периоды повышенной изменчивости — наоборот.

7. В целом, уровень оправдываемости и эффективности прогнозов после замены океанского блока формально оказался достаточно удовлетворительным и несколько выше, чем при использовании старой упрощенной модели океана (хотя мы ожидали большего). Это дает основание заключить, что методика в целом адекватно отражает природный процесс.

ЦМКП Росгидромета от 15 декабря 2016 г. рекомендовала внедрить метод среднесрочного численного прогноза ледовых условий для летнего и зимнего периодов в Баренцевом и Карском морях заблаговременностью до 1–7 суток в оперативную практику ФГБУ «ААНИИ».

### Список литературы

1. *Аппель И.Л., Гудкович З.М.* Численное моделирование и прогноз эволюции ледяного покрова арктических морей в период таяния. — Л.: Гидрометеоздат, 1992. — 143 с.

2. *Гудкович З.М., Доронин Ю.П.* Дрейф морских льдов. — СПб: Гидрометеоздат, 2001. — 112 с.

3. *Клячкин С.В., Гузенко Р.Б., Май Р.И.* Численная модель эволюции ледяного покрова арктических морей для оперативного прогнозирования // Лед и снег. — 2015. — Т. 55, № 3. — С. 83–96.

4. *Международная символика для морских ледовых карт и номенклатура морских льдов.* — Л.: Гидрометеоздат, 1984. — 56 с.

5. *Наставление по службе прогнозов.* Раздел 3. Часть III. РД 52.27.759-2011.

6. *Некрасов А.В.* Энергия океанских приливов. — Л.: Гидрометеоздат, 1990. — 288 с.

7. *Николаева А.А., Шестериков Н.П.* Метод расчета ледовых условий (на примере моря Лаптевых) // Труды ААНИИ. — 1970. — Т. 292. — С. 143–217.

8. *Технические предложения по подготовке тематических слоев ледяного покрова морей Евразийской Арктики и замерзающих морей России на основе АРМ «Ледовый Аналитик». Инструкция пользователя, версия 0.9 от 05.12.2011. Проект «Полнофункциональная единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане». — СПб: ФГБУ «ААНИИ», 2011. — 43 с. — (URL: <http://www.aari.nw.ru/resources/m0002/seaice/index.php>)*

9. *Фролов И.Е.* Численная модель осенне-зимних ледовых явлений // Труды ААНИИ. — 1981. — Т. 372. — С. 73–81.

10. *Хейсин Д.Е., Ивченко В.О.* Распространение ледовых сжатий в сплоченных льда // Океанология. — 1975. — Т. 15, № 5. — С. 803–812.

11. *Blumberg A.F., Mellor G.L.* A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model // Three-Dimensional Coastal Ocean Models. Vol. 4. — Washington, DC: American Geophysical Union, 1987. — 208 p.

12. *Foreman M.G.G.* Manual for tidal heights analysis and prediction // Pacific Marine Science. Report 77-10. — 1996. — 58 p.

13. *Locarnini R.A., Mishonov A.V., Antonov J.I. et al.* World Ocean Atlas 2013. Vol. 1: Temperature // NOAA Atlas NESDIS 73. — Washington, DC: U.S. Government Printing Ofce, 2013. — 40 p.

14. *Mellor G.L.* Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model // Program in Atmospheric and Oceanic Sciences Princeton University, Princeton, NJ 08544-0710. — 2003. — 53 p.

15. *Mellor G.L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. — 1982. — Vol. 20. — P. 851–875.

16. *Padman L., Erofeeva S. Y.* A barotropic inverse tidal model for the Arctic Ocean // Geophys. Res. Lett. — 2004. — Vol. 31 — L02303. — doi:10.1029/2003GL019003.

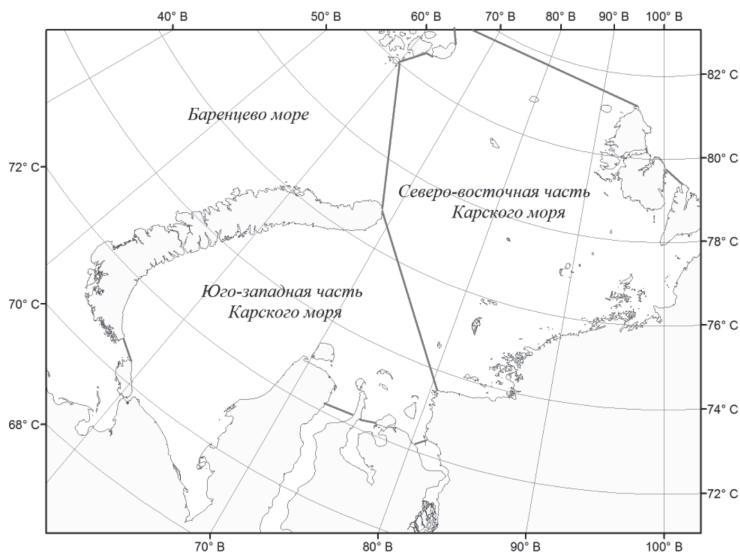
17. *Zweng, M.M., Reagan J.R., Antonov J.I. et al.* World Ocean Atlas 2013. Vol. 2. Salinity // NOAA Atlas NESDIS 74. — Washington, DC: Government Printing Ofce, 2013. — 39 p.

*В.П. Карклин, С.В. Хотченков, А.В. Юлин*

## МЕТОД ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ТИПА ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД ДЛЯ РАЙОНОВ КАРСКОГО МОРЯ

### 1. Общие положения

Анализ зимнего ледового режима Карского моря показывает, что существуют устойчивые преобладающие связи в развитии ледовых условий, учет которых позволяет разработать долгосрочный прогноз типов ледовых условий для юго-западного и северо-восточного районов Карского моря (рисунок).



**Рис. Районирование Карского моря.**

Прогноз может быть основан на преемственности показателей метеорологических и ледовых условий с учетом однонаправленности их развития при формировании ледяного покрова.

Для реализации метода необходим постоянный мониторинг показателей метеорологических и ледовых условий и учет преемственности в развитии ледовых условий зимнего периода.

Постоянный мониторинг метеорологических и ледовых показателей включает:

- температуру воздуха по данным полярных станций (для расчета сумм градусодней мороза);
- сроки устойчивого ледообразования по данным полярных станций;
- толщину припайного льда по данным полярных станций;
- количество льдов разного возраста в районах моря в конце месяца (определяется по ледовым картам и приложениями программы ArcGis).

Комплекс этих показателей позволяет диагностировать текущие ледовые условия и оценить их тип по степени сложности (тяжелый, легкий или средний).

Ледовые условия в зимний период развиваются и усложняются в процессе формирования ледяного покрова. После появления начальных льдов, по мере нарастания толщины они последовательно переходят в стадию молодых, а затем однолетних (тонких, средних, толстых).

В табл. 1 и 2 приведено среднее количество льдов различного возраста в каждом месяце зимнего периода в районах Карского моря.

По данным, приведенным в табл. 1 и 2, можно выделить средние сроки начала массового перехода однолетних льдов в старшие возрастные градации.

В юго-западной части моря переход происходит в следующие сроки:

- однолетние тонкие льды переходят в градацию однолетних средних — в январе;
- однолетние средние переходят в градацию однолетних толстых — в марте.

В северо-восточной части моря переход происходит в следующие сроки:

- однолетние тонкие переходят в градиацию однолетних средних — в декабре;
- однолетние средние переходят в градиацию однолетних толстых — в феврале.

Таблица 1

**Среднее количество льда разного возраста в период нарастания  
ледяного покрова в юго-западной части Карского моря, %**

| Месяц | Возраст льда   |              |            |                 |         |         | Старый лед |
|-------|----------------|--------------|------------|-----------------|---------|---------|------------|
|       | Начальные виды | Молодые льды |            | Однолетние льды |         |         |            |
|       |                | серый        | серо-белый | тонкий          | средний | толстый |            |
| X     | 19             | 33           | 35         | 2               | 0       | 0       | 0          |
| XI    | 9              | 17           | 48         | 21              | 0       | 0       | 0          |
| XII   | 3              | 9            | 42         | 41              | 4       | 0       | 0          |
| I     | 3              | 4            | 29         | 43              | 20      | 0       | 0          |
| II    | 6              | 6            | 27         | 25              | 36      | 5       | 0          |
| III   | 2              | 2            | 18         | 24              | 42      | 11      | 0          |
| IV    | 2              | 1            | 16         | 13              | 41      | 25      | 0          |
| V     | 0              | 0            | 11         | 11              | 39      | 32      | 0          |

Таблица 2

**Среднее количество льда разного возраста в период нарастания  
ледяного покрова в северо-восточной части Карского моря, %**

| Месяц | Возраст льда   |              |            |                 |         |         | Старый лед |
|-------|----------------|--------------|------------|-----------------|---------|---------|------------|
|       | Начальные виды | Молодые льды |            | Однолетние льды |         |         |            |
|       |                | серый        | серо-белый | тонкий          | средний | толстый |            |
| X     | 11             | 11           | 19         | 2               | 1       | 0       | 10         |
| XI    | 3              | 8            | 44         | 31              | 3       | 0       | 6          |
| XII   | 2              | 4            | 28         | 47              | 13      | 1       | 2          |
| I     | 1              | 2            | 20         | 26              | 41      | 4       | 2          |
| II    | 1              | 2            | 17         | 15              | 42      | 19      | 2          |
| III   | 1              | 1            | 15         | 12              | 34      | 33      | 2          |
| IV    | 1              | 1            | 13         | 11              | 28      | 42      | 2          |
| V     | 1              | 1            | 11         | 6               | 22      | 53      | 2          |

Установлено также, что для перехода льдов в старшую возрастную градацию должно накопиться достаточно льдов предшествующей возрастной группы. Так, для перехода однолетних тонких льдов в градацию однолетних средних, количество тонких льдов должно составлять не менее 40–60 %. Такое же соответствие характерно и для перехода однолетних средних льдов в однолетние толстые.

Нарастание толщины льда (припайного и дрейфующего) зависит от сроков начала ледообразования и интенсивности нарастания льда. Интенсивность нарастания льда, в свою очередь, зависит от суровости зимы. Хорошим показателем суровости зим является сумма градусодней мороза. Величины суммы градусодней мороза дают возможность диагностировать тип зимы — суровый, умеренный или мягкий.

Величины сумм градусодней мороза и соответствующие им типы зимы, позволяют составить представление об интенсивности нарастании льда и сроках ожидаемых переходов льдов в более старшие возрастные категории.

Важно отметить особенность различия в нарастании толщины льда в припайных и дрейфующих льдах. В припае толщина льда нарастает быстрее, чем в дрейфующих льдах. По данным полярных станций и картам распределения льда установлено, что переход толщины припайных льдов в следующую возрастную градацию происходит на 2–4 декады раньше, чем в дрейфующих льдах. Это очень важная закономерность, поскольку данные полярных станций по толщинам льда — надежный и информативный показатель ледовых условий.

Таким образом, учет преемственности и режимных особенностей формирования ледяного покрова позволяет установить ряд закономерностей, которые могут быть использованы для разработки метода долгосрочного прогноза типа ледовых условий:

- скачкообразный переход возраста льда через градацию невозможен;
- для перехода льда в следующие возрастную градацию необходимо накопление определенного количества льда (более 40 %);
- переход припайных льдов из одной возрастной градации в более старшую происходит на 2–4 декады раньше, чем в дрейфующих льдах;
- сроки переходов возрастных градаций определяются типом зимы, характеризуемой суммой градусодней мороза.

## **2. Критерии типизации для диагностики текущих и прогнозируемых ледовых условий по трем типам сложности**

Типизации ледовых условий для зимнего периода года ранее никогда не выполнялись. Расширение промышленного освоения севера, районов и сроков навигации привели к необходимости создать такую типизацию для нужд Администрации Северного морского пути (СМП) Росморречфлота.

Ледовые условия в арктических морях развиваются по сложной схеме, в которой участвуют процессы ледообразования, нарастания толщины, дрейфа и перераспределения льда. В результате совокупного действия этих факторов возникает особенная для каждого года система распределения ледяного покрова, основным отличительным показателем которого для зимнего периода может служить количество льдов разного возраста (толщины). Особенностью зимних ледовых условий является их постоянное усложнение в течение зимы, вследствие нарастания толщины льда. Зимой возможно быстрое ухудшение ледовых условий, вследствие постоянно действующих динамических процессов – дрейфа, торошения, сжатия, наслоения.

Ледовые условия зимнего периода разбиваются на три типа – легкий, средний, тяжелый, которые впоследствии используются АСМП для выдачи разрешения плавания судов. Основными принципами, положенными в основу типизации являются:

- обоснованность выбранных критериев для типизации (они должны отвечать основной задаче типизации – обеспечение безопасности плавания судов);

- объективность выбранных критериев для типизации (они не должны зависеть от субъективного мнения эксперта);

- однозначность выбранных критериев для типизации (они должны давать возможность однозначного выделения одного из трех типов ледовых условий – легкий, средний и тяжелый).

Прямые указания на то, какие ледовые условия можно считать легкими, средними, тяжелыми в нормативных документах Росморречфлота и Росгидромета отсутствуют. Существует ряд документов, в которых приведены указания по допуску судов на трассу СМП в различных ледовых условиях [1] и некоторая осредненная количественная информация о допускаемых районах эксплуатации и условиях

ледового плавания [2]. Есть накопленный опыт зимних навигаций в Карском море, плавания судов ОАО «Норильский Никель» в зимний период в юго-западной части Карского моря.

Из приведенных сведений можно установить, что ориентировочная предельная толщина ледяного покрова для судов с категориями ледовых усилений Arc 4 — Arc 6, при которой им разрешено самостоятельное плавание со скоростью до 6–8 узлов (легкие ледовые условия), составляет 0,6–1,1 м при частной сплоченности такого льда до 6 баллов. Различные вариации скорости движения, толщины и частной сплоченности льда могут дать несколько наборов разных сочетаний скорость — толщина — сплоченность, но определяющим в этом случае все равно остается толщина льда, при которой судам разрешено находиться на трассах СМП.

При строгой оценке критерия типизации к легким ледовым условиям для судов с категориями ледовых усилений Arc 4 — Arc 6 и, тем более, для судов с более высокими ледовыми категориями, Arc 7 — Arc 9, можно отнести условия, при которых *преобладают начальные, молодые и однолетние тонкие льды толщиной до 0,7 м.*

Границей средних ледовых условий, при которых разрешено плавание судов с категориями ледовых усилений Arc 6 под проводкой ледокола и самостоятельно плавание для судов с категориями ледовых усилений Arc 7, являются толщины льда до 1,2 и 1,4 м соответственно.

Средними ледовыми условиям для судов с категориями ледовых усилений Arc 6 — Arc 7 и, тем более, для судов с более высокими категориями Arc 7 — Arc 9, могут считаться условия, при которых преобладают льды возрастной градации не более однолетних средних льдов толщиной до 1,2 м.

Тяжелыми ледовыми условиями, в которых без ограничения разрешено плавать судам с категориями ледовых усилений Arc 8 — Arc 9 и ограничено судам Arc 7 могут считаться условия, при которых в районах плавания наблюдаются однолетние толстые и старые льды толщиной более 1,2 м.

Эти границы хорошо совпадают с основными возрастными градациями льда, которые надежно выделяются на ледовых картах, предусмотрены международной и национальной символикой для морских ледовых карт и номенклатурой морских льдов. Это означает, что

определение этих возрастных градаций общепринято, не вызывает затруднений у капитанов и штурманского состава судов и ледоколов [3].

Однако необходимо учитывать, что ледяной покров по мере нарастания толщины льда переходит в следующую возрастную градацию постепенно. Исследования показали, что переход ледяного покрова из однолетних тонких в однолетние средние, и далее в однолетние толстые может занимать от 1 до 4–5 декад. Первое появление более толстого льда не означает смену типа ледовых условий. В противном случае это может существенно уменьшить продолжительность навигационных периодов. Появление более старшей возрастной градации льдов должно надежно определяться по данным ИСЗ и судовым наблюдениям.

Опыт навигаций и статистические расчеты показывают, что при частной сплоченности в 1–2 балла судно при движении и маневрировании может свободно избегать встречи с льдами критичной для него возрастной градации. При частной сплоченности более 2–3 баллов избежать встречи со льдами критичной для него возрастной градации гораздо труднее, а при сплоченности более 4–5 баллов практически невозможно.

Это позволяет несколько расширить границы выбранных критериев для определения типа ледовых условий. Но необходимо учитывать, что точность при дешифрировании спутниковых снимков и определении возраста льдов и границ распространения льдов составляет около  $\pm 1$  балла. Поэтому предлагается установить границу возможного присутствия нежелательных льдов в 2–3 балла (25 % от общего количества всех льдов). Это гарантирует, что количество нежелательных льдов при ошибке дешифрирования (что случается достаточно редко) не превысит 4 баллов (40 %) общего количества льдов, сплоченность, при которой избежать встречи с такими льдами будет невозможно.

В юго-западной части Карского моря припайные льды расположены узкой полосой вдоль берега, на *мелководье*, и не имеют навигационного значения. Поэтому их *предлагается* не учитывать в возрастном составе льдов, среди которых происходит плавание.

В северо-восточной части моря припай с определенного момента перекрывает западные подходы к проливу Вилькицкого. Припай является средой активного судоходства и состав льдов в нем необходимо учитывать.

С учетом вышеназванного предлагается установить (разработаны) следующие критерии (граничные условия) для определения типов ледовых условий в Карском море для зимнего периода.

**Легкий тип ледовых условий** — на акватории района наблюдаются начальные, молодые и однолетние тонкие льды (до 0,7 м), возможно появление и присутствие однолетних средних льдов в количестве до 25 % ( $S_{\text{средн}} < 25 \%$ );

**Средний тип ледовых условий** — на акватории района наблюдаются однолетний средний лед (до 1,2 м) в количестве от 25 % и более ( $S_{\text{средн}} \geq 25 \%$ ), возможно появление и присутствие однолетних толстых льдов в количестве до 25 % ( $S_{\text{толст}} < 25 \%$ );

**Тяжелый тип ледовых условий** — на акватории района наблюдаются однолетний толстый лед (более 1,2 м) и старые льды в количестве от 25 % ( $S_{\text{толст}} \geq 25 \%$ ) и более.

### **3. Метод долгосрочного прогноза типа зимних ледовых условий на основе использования взаимосвязей и преемственности в развитии ледовых условий**

При построении прогностической схемы долгосрочного прогноза типа зимних ледовых условий (было решено) используется ряд устойчивых и хорошо проявляющихся признаков:

- связь нарастания льда (в связи) с типом суровости зимы (суммой градусодней мороза);

- преемственность в последовательном развитии ледовых условий (последовательное накопление льдов младшей возрастной градации для перехода его в старшую градацию);

- более ранний переход припайных льдов в старшую возрастную градацию.

Для прогноза появления льдов различных возрастных градаций и изменения их количества в качестве исходных данных используются следующие показатели:

- тип зимы по данным долгосрочного метеорологического прогноза;

- суммы градусодней мороза для определения типа зимы — суровый, умеренный или мягкий, и даты устойчивого ледообразования на полярных станциях;

- толщина припайных льдов на полярных станциях для определения срока достижения градации однолетних тонких, средних и толстых льдов;
- количество льдов разного возраста в районах Карского моря (рассчитывается по оцифрованной ледовой карте, построенной по данным ИСЗ в центре ледовой и гидрометеорологической информации ФГБУ «ААНИИ»).

Каждый из показателей надежно рассчитывается по данным полярных станций или по данным ИСЗ.

Прогнозируемым показателем в разработанной прогностической схеме являются даты устойчивого перехода льдов (***D***) в возрастные градации однолетнего среднего и однолетнего толстого льда в количестве достаточном для идентификации среднего или тяжелого типов ледовых условий в соответствии с критерием (равно или более 25 %) на прогнозируемый месяц.

Для получения прогнозируемой величины ***D*** необходимо определить дату ***d*** которая соответствует дате перехода льдов в следующую возрастную градацию (градации однолетних средних или однолетних толстых) для каждого типа лет по суровости зимы. Для этого используются прогностические таблицы, приведенные ниже для каждого района Карского моря, в которых по двум основным входным параметрам — тип суровости зимы и дата перехода толщины припайных льдов в следующую возрастную градацию, определяется дата устойчивого перехода дрейфующих льдов в следующую возрастную градацию (табл. 3–6).

Таблица 3

**Сроки достижения льда в припае толщины однолетнего среднего (70 см) и перехода дрейфующих однолетних тонких льдов в градацию однолетних средних в различные типы зим в юго-западной части Карского моря**

| Тип зимы  | Дата перехода однолетних тонких льдов в градацию однолетних средних в припае (месяц, декада)      |      |      |      |       |       |       |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|
|           | ХП–1                                                                                              | ХП–2 | ХП–3 | І–1  | І–2   | І–3   | ІІ–1  |
|           | Дата возможного перехода однолетних тонких льдов в градацию однолетних средних в дрейфующих льдах |      |      |      |       |       |       |
| Суровый   | ХП–3                                                                                              | І–1  | І–2  | І–3  | ІІ–1  | —     | —     |
| Умеренный | І–2                                                                                               | І–3  | ІІ–1 | ІІ–2 | ІІ–3  | ІІІ–1 |       |
| Мягкий    | —                                                                                                 | ІІ–1 | ІІ–2 | ІІ–3 | ІІІ–1 | ІІІ–2 | ІІІ–3 |

Таблица 4

**Сроки достижения льда в припае толщины однолетнего толстого (120 см) и перехода дрейфующих однолетних средних льдов в градиацию однолетних толстых в различные типы зим в юго-западной части Карского моря**

| Тип зимы  | Дата перехода однолетних средних льдов в градиацию однолетних толстых в припае (месяц, декада)      |       |       |       |       |       |       |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|           | I–3                                                                                                 | II–1  | II–2  | II–3  | III–1 | III–2 | III–3 |
|           | Дата возможного перехода однолетних средних льдов в градиацию однолетних толстых в дрейфующих льдах |       |       |       |       |       |       |
| Суровый   | II–3                                                                                                | III–1 | III–2 | III–3 | IV–1  | —     | —     |
| Умеренный | III–2                                                                                               | III–3 | IV–1  | IV–2  | IV–3  | V–1   | —     |
| Мягкий    | IV–1                                                                                                | IV–2  | IV–3  | V–1   | V–2   | V–3   | —     |

Таблица 5

**Сроки достижения льда в припае толщины однолетнего среднего (70 см) и перехода дрейфующих однолетних тонких льдов в градиацию однолетних средних в различные типы зим в северо-восточной части Карского моря**

| Тип зимы  | Дата перехода однолетних тонких льдов в градиацию однолетних средних в припае (месяц, декада)      |       |       |       |       |      |      |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|
|           | XI–2                                                                                               | XI–3  | XII–1 | XII–2 | XII–3 | I–1  | I–2  |
|           | Дата возможного перехода однолетних тонких льдов в градиацию однолетних средних в дрейфующих льдах |       |       |       |       |      |      |
| Суровый   | XII–1                                                                                              | XII–2 | XII–3 | I–1   | I–2   | I–3  | —    |
| Умеренный | XII–2                                                                                              | XII–3 | I–1   | I–2   | I–3   | II–1 | —    |
| Мягкий    | —                                                                                                  | I–1   | I–2   | I–3   | II–1  | II–2 | II–3 |

Таблица 6

**Сроки достижения льда в припае толщины однолетнего толстого (120 см) и перехода дрейфующих однолетних средних льдов в градиацию однолетних толстых в различные типы зим в северо-восточной части Карского моря**

| Тип зимы  | Дата перехода однолетних средних льдов в градиацию однолетнего толстые в припае (месяц, декада)     |       |       |       |       |      |       |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
|           | I–1                                                                                                 | I–2   | I–3   | II–1  | II–2  | II–3 | III–1 |
|           | Дата возможного перехода однолетних средних льдов в градиацию однолетних толстых в дрейфующих льдах |       |       |       |       |      |       |
| Суровый   | I–3                                                                                                 | II–1  | II–2  | II–3  | III–1 | —    | —     |
| Умеренный | II–2                                                                                                | II–3  | III–1 | III–2 | III–3 | IV–1 | —     |
| Мягкий    | —                                                                                                   | III–2 | III–3 | IV–1  | IV–2  | IV–3 | V–1   |

Таким образом, по данным табл. 3–6 определяется предварительная дата (***d***) устойчивого перехода дрейфующих льдов в следующую возрастную градацию, которая определяется по двум параметрам — дата перехода припайных льдов в следующую возрастную градацию и тип зимы по степени суровости.

Приведенные в табл. 3–6 соотношения справедливы для ледовых условий, при которых на акватории района наблюдается достаточное количество льда младшей возрастной градации от 20 до 40 %. Если накопленного льда младшей возрастной градации недостаточно, менее 20 %, переход может задерживаться, а если избыточно — более 40 % — осуществиться раньше.

Таким образом, окончательный результат прогноза — дата перехода дрейфующего льда в следующую возрастную градацию ***D*** — определяется с учетом количества льдов разного возраста в конце месяца, который предшествует прогнозируемому месяцу, и может быть сформулирован следующим образом:

- при среднем количестве льда младшей возрастной градации в пределах 20–40 % ***D* = *d***;

- при количестве льда младшей возрастной градации менее 20 % ***D* = *d*** плюс 1 декада;

- при избыточном количестве льда младшей возрастной градации более 40 % ***D* = *d*** минус 1 декада.

Окончательно прогноз состоит в формулировке ожидаемого типа ледовых условий (легкий, средний, тяжелый) в юго-западном и северо-восточном районах Карского моря.

#### 4. Пример составления прогноза

Ниже приведен пример разработки прогноза типа ледовых условий для юго-западной части Карского моря.

1. Входные данные прогноза:

Район — юго-западная часть моря.

Дата составления прогноза — 30 декабря 2012 г.

Прогнозируемый период — январь 2013 г.

Исходный тип ледовых условий в декабре — легкий по количеству молодых и однолетних тонких льдов в конце декабря.

## 2. Исходные данные:

Температура воздуха, по которой определена сумма градусодней мороза на конец декабря по данным полярной станции о. Диксон — 1487.

Тип зимы в соответствии с величиной суммы градусодней мороза — умеренный.

Дата перехода толщины припайного льда из градации однолетнего тонкого в градацию однолетнего среднего по данным полярной станции Диксон — вторая декада декабря (XII<sub>2</sub>).

Количество дрейфующих льдов разного возраста на акватории юго-западного района Карского моря на 30.12.2012 г. составляет 96%, из них:

- начальные виды и молодые льды — соответственно, 15 % и 21%,
- однолетние тонкие льды 64 %, однолетние средние льды — 0 %, однолетние толстые льды — 0 %.

## 3. Определение типа зимних ледовых условий

По типу суровости зимы (умеренный) и дате перехода однолетних тонких льдов в припае в возрастную градацию однолетних средних (XII—2) по табл. 3, определяем, что ожидаемая дата перехода дрейфующих однолетних тонких льдов в однолетние средние:

$$d = \text{третья декада января (I}_3\text{)}.$$

Уточняем дату перехода  $D$  с учетом количества накопленного однолетнего тонкого льда в юго-западной части Карского моря, равного 64%:

$$D = d \text{ минус 1 декада.}$$

Таким образом, дата перехода дрейфующих однолетних тонких льдов в однолетние средние льды ожидается начиная со второй декады января.

Окончательная формулировка прогноза типа ледовых условий выглядит так: переход от легкого типа ледовых условий к среднему типу в январе 2013 г. в юго-западной части Карского моря ожидается со второй декады января; таким образом, в январе 2013 г. в целом ожидается средний тип ледовых условий.

## 5. Результаты испытаний метода прогноза

В период октябрь 2014 г. — май 2015 г. проводились авторские ретроспективные испытания (за прошедший период), в период октябрь 2015 г. — май 2016 г. проводились производственные испытания с предоставлением результата прогноза непосредственно потребителю (как опытного прогноза).

Всего за период испытаний было составлено восемь долгосрочных прогнозов для каждого из районов моря в период испытаний 2014–2015 гг. (16 прогнозов по морю) и восемь долгосрочных прогнозов для каждого из районов моря в период испытаний 2015–2016 гг. (16 прогнозов по морю). Итого в общей сложности было разработано 32 долгосрочных прогноза с месячной заблаговременностью. Определяемость прогнозов для юго-западной части Карского моря составила 88 %, для северо-восточной части моря – 94 %. Средняя определяемость составила 91 % при климатической обеспеченности 75 % и эффективности 16 %.

### **Выводы**

ЦМКП Росгидромета на заседании 7 декабря 2016 г. рекомендовала:

– одобрить работу ФГБУ «ААНИИ» по разработке критериев типизации ледовых условий для плавания судов по трем типам (легкий, средний, тяжелый) и метода прогноза типа ледовых условий в юго-западном и северо-восточном районах Карского моря в зимний период с нулевой заблаговременностью на 30 суток.

– ФГБУ «ААНИИ» внедрить метод долгосрочного прогноза типа ледовых условий в юго-западном и северо-восточном районах Карского моря в зимний период на 30 суток в оперативную практику ФГБУ «ААНИИ» в качестве основного.

### **Список литературы**

1. *Правила* плавания в акватории Северного морского пути. – М.: Изд-во Минтранс России, 2013. – 18 с.
2. *Правила* классификации и постройки морских судов. Том 1. – СПб.: Изд-во Российского морского регистра судоходства, 2015. – 580 с.
3. *Международная* символика для морских ледовых карт и номенклатура морских льдов. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 56 с.
4. *Юлин А.В.* Автоматизированный программный комплекс по обработке и обобщению гидрометеоинформации, используемой в системе «Пегас» // Труды ААНИИ. – 1990. – Т. 418. – С. 25–36.

*С.А. Мысленков, Е.В. Столярова, В.С. Архипкин*

## **СИСТЕМА ПРОГНОЗА ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ В ЧЕРНОМ МОРЕ С ДЕТАЛИЗАЦИЕЙ В ШЕЛЬФОВЫХ ЗОНАХ**

### **Введение**

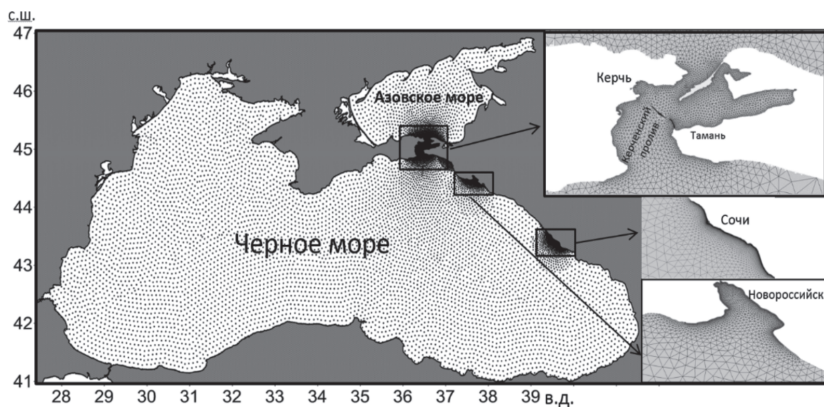
В наши дни уделяется большое внимание прогнозу ветрового волнения в морях, омывающих берега России. В ФГБУ «Гидрометцентр России» в оперативном режиме работает система прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане [1, 2] и в морях России [12]. В [12] приводятся результаты испытания этой системы для акваторий Азовского, Черного и Каспийского морей. Однако не менее важным для потребителей представляется прогнозирование параметров ветрового волнения с высоким пространственным разрешением для отдельных сравнительно небольших акваторий (бухт, гаваней, портов и др.).

Для исследования климатических характеристик ветрового волнения и его прогнозирования в Черном море существует несколько подходов использования современных ветро-волновых моделей [4, 5, 7, 12, 13, 19]. В этих работах приводится информация об основных достижениях в моделировании ветрового волнения, описание моделей и оценки их качества. Можно отметить [5], где для составления морского регистра использовалась модель SWAN.

В данной статье описывается технология прогноза ветрового волнения в Черном море с детализацией в шельфовых зонах. Прогноз волнения осуществляется с использованием спектральной волновой модели SWAN на нерегулярной вычислительной сетке и прогностических полей ветра GFS. Приводятся результаты сравнения прогнозов высоты волн с данными прямых измерений для глубокой воды и для прибрежной зоны.

## Используемые данные и методы прогноза

В работе использовалась технология прогноза параметров ветрового волнения в Черном море с использованием спектральной волновой модели SWAN [14, 20] на нерегулярной вычислительной сетке, включающей в себя Черное и Азовское моря с шагом по пространству 6–12 км, а также Керченский пролив, Цемесскую бухту и район Сочи с шагом до 200 м (рис. 1). Общее количество узлов сетки в рассматриваемой зоне – 12131. Качественная батиметрическая основа является обязательным условием для успешного моделирования ветрового волнения в прибрежной зоне. Для решения поставленной задачи были использованы карты прибрежной зоны Черного моря, изданные Главным управлением навигации и океанографии Министерства обороны России. Благодаря специальной нерегулярной вычислительной сетке, эта система более приспособлена для прогноза ветрового волнения в прибрежных и мелководных районах. Более подробное описание модели, вычислительной сетки и оценки качества приводятся в [6–11].



**Рис. 1. Вычислительная сетка для системы прогноза ветрового волнения в шельфовых зонах Черного моря.**

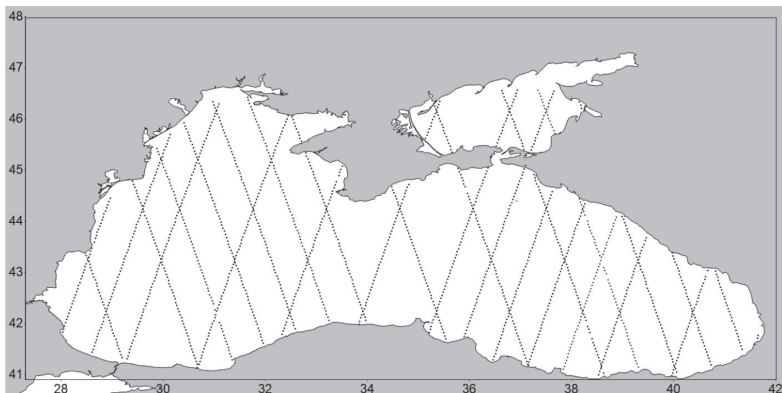
Для прогноза ветрового волнения использовались данные о полях ветра системы GFS (Global Forecasting System), функционирующей в метеорологическом центре NCEP/NOAA. Пространственное разрешение системы GFS оставляет  $0,5^\circ$ , временной шаг 3 часа [18]. Начиная с 2015 года доступны прогнозы GFS на сетке  $0,25^\circ$ .

Созданная система обеспечивает прогнозирование на срок до трех суток следующих характеристик ветрового волнения: высоты значительных волн (англ. significant wave height), среднего направления распространения, средней длины и среднего периода.

Для оценки качества прогностических расчетов модели на мелкой воде проводились сравнения результатов прогнозов с данными прямых измерений в Цемесской бухте для периода январь—апрель и сентябрь 2010 г. Данные измерений получены при помощи лазерного уровнемера Riegl, установленного в Цемесской бухте на конце нефтеналивного терминала нефтепорта «Шесхарис». Глубина моря в точке измерений составляет 22 м. Частота измерений — 3 Гц, а заявленная точность измерения волнения — 2 см. В работе использованы данные о высоте значительных волн с временной дискретностью 15 мин. Результаты сравнения данных измерений в Цемесской бухте с данными моделирования волнения на основе ветра из реанализа NCEP/CFSR приведены в [6, 10, 17].

На основе архивных данных прогнозов ветра GFS был выполнен прогноз ветрового волнения на всей вычислительной сетке. Далее из результатов моделирования были выбраны данные для точки в Цемесской бухте, соответствующей расположению лазерного уровнемера. Всего было рассчитано 149 ежедневных прогнозов с заблаговременностью до 72 часов (для периода 1 января — 31 апреля и сентябрь 2010 года) с шагом 3 часа.

Для оценки качества прогнозов ветра и ветрового волнения на глубокой воде использовались спутниковые данные альтиметра AltiKa, находящегося на борту спутника SARAL. Данные о высоте значительных волн и скорости ветра имеют пространственное разрешение около 7 км и доступны на сайте [21]. За период с 7.02. по 1.03.2015 г. были получены спутниковые данные для 4500 точек, находящихся на удалении не более чем в 10 км от узлов расчетной сетки модели SWAN (рис. 2). Среднеквадратическая ошибка (СКО) вычисления высоты значительных волн альтиметрами обычно оценивается примерно в 0,3 м [16]. В [15] приводятся результаты оценки качества альтиметра AltiKa и показано, что для высоты волн СКО составляет 0,21 м, систематическая ошибка — 0,04 м, для скорости ветра 1,75 м/с и 0,25 м/с соответственно.



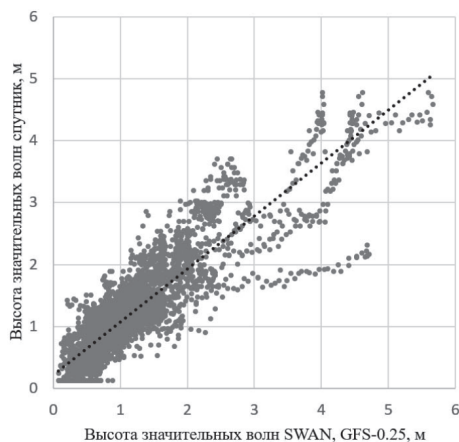
**Рис. 2. Схема треков альтиметра AltiKa.**

### **Оценка качества прогнозов ветрового волнения на глубокой воде**

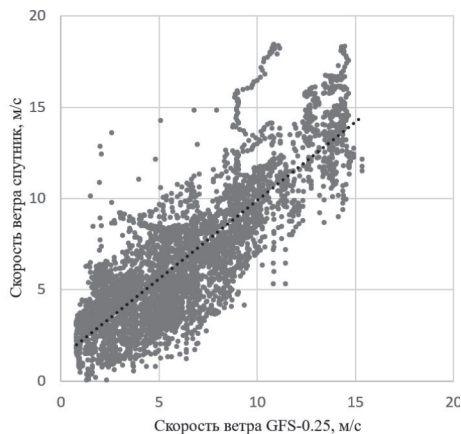
В целом высота волны диагностической версии модели хорошо согласуется с данными спутников [17]. Средняя ошибка составляет около 0,3 м, однако если посмотреть на распределение высоты значительных волн по данным альтиметрии, то можно заметить, что приблизительно в 12 % случаев ошибка менее 0,3 м. С другой стороны, известно, что точность данных альтиметрии не идеальна, а при их сравнении с более достоверными данными волновых буев ошибка СКО составляет около 0,3 м [16]. Следовательно, данные альтиметрии со значениями менее 0,3 м находятся за пределами ее точности и должны быть удалены из анализа. Более того, из распределения высоты значительных волн можно видеть, что около 70 % записей имеют высоту менее 1 м, следовательно, оценки погрешностей в этом диапазоне высот не представляют особого интереса.

Для февраля 2015 года результаты прогнозов по ветро-волновой модели были сопоставлены с данными о высоте волн по альтиметру AltiKa. Сопоставлялись высоты волн в узлах расчетной сетки модели SWAN с ближайшими точками альтиметра. Расстояние между парами сравниваемых точек составило не более 10 км. Поскольку прогнозы волн и ветра рассчитывались ежедневно заблаговременностью до 72 ч, то одни и те же данные спутника за конкретный день служили для оценки качества прогноза разной заблаговременности. Результаты сравнения всех данных

(разная заблаговременность) представлены на диаграмме (рис. 3, 4). В целом, рассчитанные значения хорошо согласованы, корреляция по высоте волн составляет 0,892 при форсинге GFS-0,25°, для скорости ветра 0,835 соответственно. Среднеквадратическая ошибка по высоте волны составляет 0,4 м, по ветру — 2 м/с. Величина СКО по ветровому волнению немного больше в испытываемом методе, чем по результатам других исследований. Однако в нашем случае анализировались все высоты волн от 0,15 м. Если рассчитать СКО для волн высотой более 2 м, то ошибка уменьшается до 0,25 м.



**Рис. 3. Сравнение высоты волн с использованием форсинга GFS-0,25° с данными спутника.**

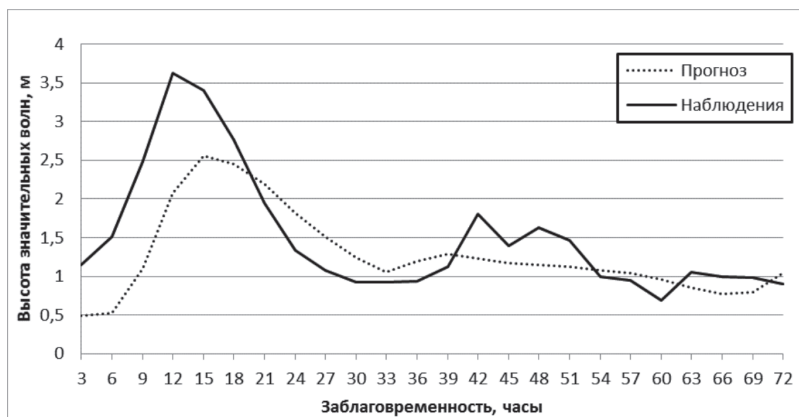


**Рис. 4. Сравнение скорости ветра с использованием форсинга GFS-0,25° с данными спутника.**

## Оценка качества прогнозов ветрового волнения на мелкой воде

На основе архивных данных прогнозов ветра GFS был выполнен прогноз ветрового волнения на всей вычислительной сетке. Далее из результатов моделирования ветрового волнения были выбраны данные для точки в Цемесской бухте, соответствующей расположению лазерного уровнемера. Всего было рассчитано 149 ежедневных прогнозов заблаговременностью до 72 часов (для периода январь — сентябрь 2010 года) с шагом 3 часа. Прогнозы высоты значительных волн сравнивались с данными наблюдений, статистические параметры оценивались для каждой заблаговременности.

На рис. 5 представлено сравнение высоты волн по данным наблюдений и по результатам прогноза на 72 часа от 29.01.2016 г. По данным измерений максимальная высота значительных волн была 3,6 м и наблюдалась 29.01.2010 г., однако по данным прогноза высота волны была занижена и составила 2,5 м.



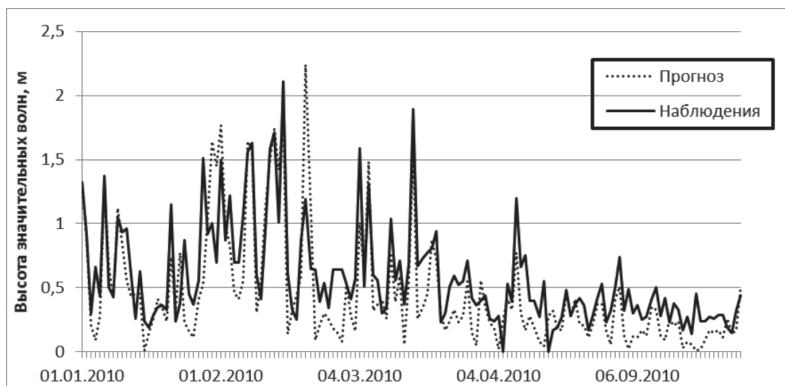
**Рис. 5. Высота значительных волн по данным наблюдений и прогноза от 29.01.2016 г.**

Результаты сравнения прогнозов высоты волн заблаговременностью 6 и 72 часа с данными наблюдений приведены на рис. 6 и 7. Видно, что качество прогнозов с небольшой заблаговременностью существенно выше.

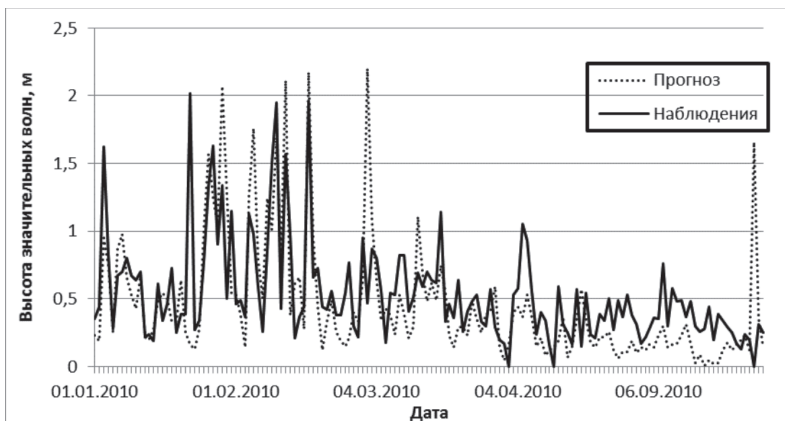
Средняя корреляция между данными наблюдений и прогнозом составила 0,75, максимум 0,82 для прогноза на 6 часов, минимум 0,62

для прогноза на 72 часа (рис. 8). Среднеквадратическое отклонение изменяется от 0,08 м до 0,14 м, постепенно увеличиваясь с увеличением заблаговременности прогноза.

Однако за исследуемый период высота волн по данным измерений редко превышала 2 м, что затрудняет оценку качества прогноза ветрового волнения. Для получения более корректных оценок период сравнения должен составлять не менее двух-трех лет.



**Рис. 6. Высота волн по данным наблюдений и прогнозов с заблаговременностью 6 ч.**



**Рис. 7. Высота волн по данным наблюдений и прогнозов с заблаговременностью 72 ч.**



**Рис. 8. Коэффициент корреляции между данными наблюдений и прогнозов высоты волн разной заблаговременности.**

В целом полученные оценки качества не уступают подобным оценкам для диагностической версии системы [3, 10, 17] и основным мировым системам прогноза ветрового волнения [1, 12, 13, 19].

### **Заключение**

На основе спектральной волновой модели SWAN была создана технология регионального прогноза ветрового волнения в Черном море с детализацией в шельфовых зонах. Оперативная прогностическая система работает на основе полей прогноза ветра GFS. Расчеты производились с использованием оригинальной нерегулярной сетки, что позволило получить модельные параметры ветрового волнения с шагом по пространству 200–300 м. Детальный прогноз ветрового волнения визуализирован для Керченского пролива, Цемесской бухты и района Сочи. При сравнении прогнозов по значительной высоте волн с измерениями были получены статистические показатели качества модели, которые являются вполне удовлетворительными для современных ветро-волновых моделей (коэффициент корреляции 0,8, среднеквадратическая ошибка 0,3 м). Модель хорошо воспроизводит как фазу наступления максимального волнения, так и абсолютные высоты.

## Список литературы

1. Зельченко А.А., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С. Результаты испытаний системы прогнозирования ветрового волнения в мировом океане // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. — 2016. — № 43. — С. 133–147.
2. Зельченко А.А., Струков Б.С., Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л. Система прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане и морях России // Труды государственного океанографического института. — 2014. — Т. 215. — С. 90–101.
3. Ивонин Д.В., Мысленков С.А., Чернышов П.В., Архипкин В.С., Телегин В.А., Куклев С.Б., Чернышова А.Ю., Пономарев А.И. Система мониторинга ветрового волнения в прибрежной зоне Черного моря на основе радиолокации, прямых наблюдений и моделирования: первые результаты // Проблемы региональной экологии. — 2013. — № 4. — С. 172–183.
4. Кабатченко И.М., Резников М.В. Моделирование морского ветрового волнения, методы и аспекты прикладного применения. - Труды государственного океанографического института. — 2011. — Т. 213. — С. 205–215.
5. Лопатухин Л.И., Бухановский А.В., Иванов С.В., Чернышова Е.С. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей // Российский морской регистр судоходства. — СПб, 2006. — 452 с.
6. Мысленков С.А., Архипкин В.С. Анализ ветрового волнения в Цемесской бухте Черного моря с использованием модели SWAN // Труды Гидрометцентра России. — 2013. — Вып. 350. — С. 58–67.
7. Мысленков С. А., Архипкин В. С. Система регионального прогноза ветрового волнения в Цемесской бухте Черного моря // Труды ГОИН, — 2014, — Т. 215. — С. 117–125.
8. Мысленков С.А., Столярова Е.В. Прогноз ветрового волнения в Черном море с использованием прогностических полей ветра различного пространственного разрешения // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. — 2016. — № 362. — С. 55–65.
9. Мысленков С.А., Столярова Е.В., Архипкин В.С. Прогноз ветрового волнения высокого пространственного разрешения для Керченского пролива, Цемесской бухты и района Сочи // Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования материалы молодежной научной конференции. — 2016. — С. 327–331.
10. Мысленков С.А., Шестакова А.А., Торопов П.А. Численное моделирование штормового волнения у северо-восточного побережья Черного моря // Метеорология и гидрология. — 2016. — № 10. — С. 61–71.
11. Столярова Е.В., Мысленков С.А. Прогноз ветрового волнения высокого пространственного разрешения в Керченском проливе // Труды Гидрометцентра России. — 2015. — Вып. 354. — С. 24–35.

12. Струков Б.С., Зеленько А.А., Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л. Система прогнозирования характеристик ветрового волнения и результаты ее испытаний для акваторий Азовского, Черного и Каспийского морей // Информационный сборник № 40 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». — 2013. — С. 64–79.
13. Akpinar A., S. Ponce de León. An assessment of the wind re-analyses in the modelling of an extreme sea state in the Black Sea // Dynamics of Atmospheres and Oceans. — 2016. — Vol. 73. — P. 61–75.
14. Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H. A third-generation wave model for coastal regions. Part I: Model description and validation // J. Geoph. Res. — 1999. — Vol. 104. — P. 7649–7666.
15. Chiranjivi Jayaram, Saurabh Bansal et. al. Evaluation of SARAL/AltiKa Measured Significant Wave Height and Wind Speed in the Indian Ocean Region // J. Indian Soc. Rem. Sens. — 2016. — Vol. 44, Issue 2. — P. 225–231.
16. Janssen P., Abdalla S., Hersbsch H., Bidlot J-R. Error estimation of buoy, satellite, and model wave height data // J. Atm. Ocean. Tech. — 2006. — Vol. 24, Issue 9. — P. 1665.
17. Myslenkov S., Chernyshova A. Comparing wave heights simulated in the Black sea by the SWAN model with satellite data and direct wave measurements // Russian Journal of Earth Sciences. — 2016. — Vol. 16. — N 5. — P. 1–12.
18. National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce (2015), NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Auxiliary Grids Historical Archive, Accessed: 03 Jan 2016.
19. Rusu E. Strategies in using numerical wave models in ocean/coastal applications. // Journal of Marine Science and Technology. — 2011. — Vol. 19. — P. 58–75.
20. SWAN Technical Documentation, SWAN Cycle III version 40.51A. — Netherlands, Delft: University of Technology, 2007. — 98 p.
21. <http://rads.tudelft.nl/rads/rads.shtml>

*С.В. Борщ, Ю.А. Симонов, А.В. Христофоров, Н.М. Юмина*

## **КРАТКОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОВНЕЙ ВОДЫ НА РЕКЕ АМУР**

### **Введение**

В рамках реализации Технического проекта восстановления, модернизации и развития гидрометеорологической сети наблюдений и системы гидрологического прогнозирования в бассейне р. Амур отделом речных гидрологических прогнозов Гидрометцентра России для разных участков р. Амур разработана система методик краткосрочного прогнозирования уровней воды с заблаговременностью от одних до пяти суток. В основе этих методик ввиду недостаточной гидрометеорологической изученности территории лежит метод соответственных уровней, позволяющий упрощенно описывать движение и трансформацию волн паводков и половодий в русловой сети на основе данных гидрометрических наблюдений. Метод реализован для 15 участков на реке Амур от с. Покровка в верхнем течении до г. Комсомольск-на-Амуре в нижнем течении.

### **Условия формирования стока и водный режим рек бассейна Амура**

Река Амур является одной из крупнейших рек Северо-Восточной Азии. Бассейн реки расположен на территории трех государств: России, Монголии и Китая. По площади бассейна (1855 тыс. км<sup>2</sup>) Амур занимает четвертое место среди рек России (после Енисея, Оби и Лены) и десятое место среди рек мира. По водности (средний годовой объем стока равен 356 км<sup>3</sup> [2]) Амур является четвертой крупнейшей рекой России и тринадцатой — в мире.

Разнообразие ландшафтов, климатических условий (резко выраженный континентальный климат на западе и муссонный на востоке), контрасты элементов рельефа и другие физико-географические факторы вызывают неоднородность формирования стока рек в бассейне

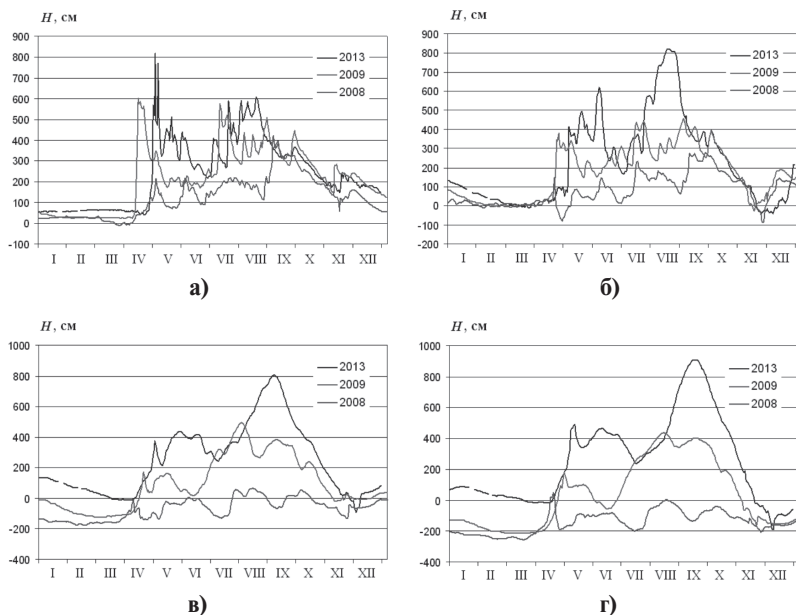
Амура. В целом водный режим рек бассейна Амура характеризуется прохождением дождевых паводков в теплую часть года, относительно невысоким половодьем и устойчивой зимней меженью либо прекращением стока вследствие перемерзания. Доля дождевого питания на водосборе Верхнего и Среднего Амура составляет в среднем 50–70 % общего годового стока, на снеговое питание приходится 10–20 %, на подземное – 10–30 %. На Нижнем Амуре доля дождевого питания составляет до 80 %, тогда как снегового – всего 2–6 % [3, 4]. При этом, в зависимости от водности года соотношение источников питания рек меняется.

Главной фазой водного режима рек являются дождевые паводки, наблюдающиеся в теплое время года. На паводочный период приходится большая часть годового стока. Большая часть паводков проходит с июля по сентябрь, но бывают и июньские и октябрьские паводки. Майские паводки имеют обычно смешанное снегово-дождевое происхождение. Число паводков сильно меняется от года к году, в среднем за летне-осенний период проходит до 15 паводков. Второй важной фазой водного режима является снеговое половодье, характерное для всех рек бассейна. Весеннее половодье длится в среднем 20–30 дней, начинаясь в первой половине апреля и заканчиваясь во второй половине мая. Интенсивность подъема уровней воды во время половодья меньше, чем в периоды прохождения паводков. Объем стока весеннего половодья в среднем составляет около 15 % от общего объема годового стока. Летняя межень у рек Амурского бассейна обычно не выражена. Паводочный период, как правило, накладывается на половодье, промежутки между паводками относительно не велики. Осенью с уменьшением количества осадков водность рек снижается. Зимой реки полностью переходят на подземное питание. Доля зимнего стока крайне мала – менее 5 % от годового, что связано с суровостью климата, большими затратами на ледо- и наледообразование и наличием многолетнемерзлых пород.

В форме гидрографа Верхнего Амура благодаря ливневым осадкам выделяются высокие паводки «игольчатой» формы, идущие сериями друг за другом. Сверху вниз по течению Амура вследствие наложения отдельных паводков друг на друга формируются более крупные паводочные волны. Гидрограф стока Нижнего Амура представляет собой чередование 3–4 сглаженных и достаточно продолжительных паводочных

волн, сформированных в результате суперпозиции отдельных паводков, идущих как с верховьев, так и с близлежащих притоков (рис. 1).

В многолетнем плане для рек бассейна Амура характерно чередование фаз повышенной и пониженной водности. Различия в стоке за многоводный и маловодный год на реке Амур существенны и могут достигать 1,5–2 раза на Верхнем и Среднем Амуре и 2,5–3,5 раза на Нижнем Амуре (рис. 1).



**Рис. 1. Графики колебаний уровней воды на реке Амур в разные по водности годы: а) р. Амур – с. Джалинда; б) р. Амур – г. Благовещенск; в) р. Амур – г. Хабаровск; г) р. Амур – г. Комсомольск-на-Амуре.**

В многоводные годы паводочный режим стока рек бассейна Амура создает серьезную угрозу населению и хозяйственным объектам территории. Вызванные прохождением высоких дождевых паводков наводнения могут привести к человеческим жертвам и значительным социально-экономическим ущербам (например, наводнение 2013 года). Это обусловило необходимость разработки методик краткосрочного

прогнозирования опасных паводков на основе использования современных данных наблюдений за водным режимом рек бассейна.

### **Методика прогнозирования уровней воды**

В настоящее время ФГБУ «Гидрометцентр России» располагает достаточно надежными методиками прогнозирования расходов (уровней) воды, основанными на математическом моделировании как процессов перемещения волн паводков в руслах рек, так и процессов формирования стока на водосборе с использованием метеорологических данных, и детальном математическом описании трансформации волн паводков в руслах рек [1, 5]. Однако для бассейна реки Амур ввиду неоднородных физико-географических условий формирования стока в различных его частях заметна недостаточность данных гидрометеорологических наблюдений, особенно в горных районах (в верховьях рек-притоков Амура), где сложный характер распределения осадков и снежного покрова затрудняет получение необходимого их объема с помощью интерполяции метеорологических характеристик по имеющимся данным наблюдений. В связи с трансграничным положением реки Амур на большинстве гидрологических постов реки имеются данные наблюдений только за уровнем воды. В связи с этим, в соответствии с принципом соответствия метода прогноза объему и качеству исходных гидрометеорологических данных, для реки Амур одним из наиболее эффективных методов прогнозирования является метод соответственных уровней.

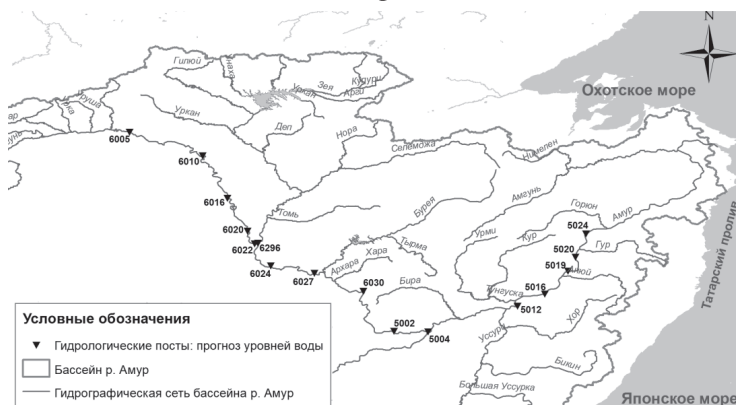
Для построения методик прогноза уровней воды на р. Амур использовались суточные данные наблюдений за уровнем воды на 16 постах сети Росгидромета, расположенных непосредственно на реке Амур, и на двух постах, расположенных в замыкающих створах основных притоков Амура – реках Зея и Уссури (рис. 2). В расчетах были использованы данные за период с 2008 по 2010, 2013 гг., включающие как маловодный год (2008), так и многоводные годы (2009, 2013).

Способы получения прогнозных связей различались в зависимости от условий формирования стока на конкретном участке реки. На бесприточных или слабоприточных участках реки уровень воды  $H_H(t + \tau)$  в нижнем створе на момент времени  $t + \tau$  прогнозируется по его статистической связи со значением уровня в верхнем створе

$H_B(t)$ , соответствующего той же фазе прохождения паводка, и от значения уровня воды в нижнем створе  $H_H(t)$  за предшествующий момент времени  $t$ , характеризующего инерционный прогноз (1). При этом время добегания соответственных уровней воды на данном участке  $\tau$  рассчитывается по его зависимости от  $H_B(t)$ .

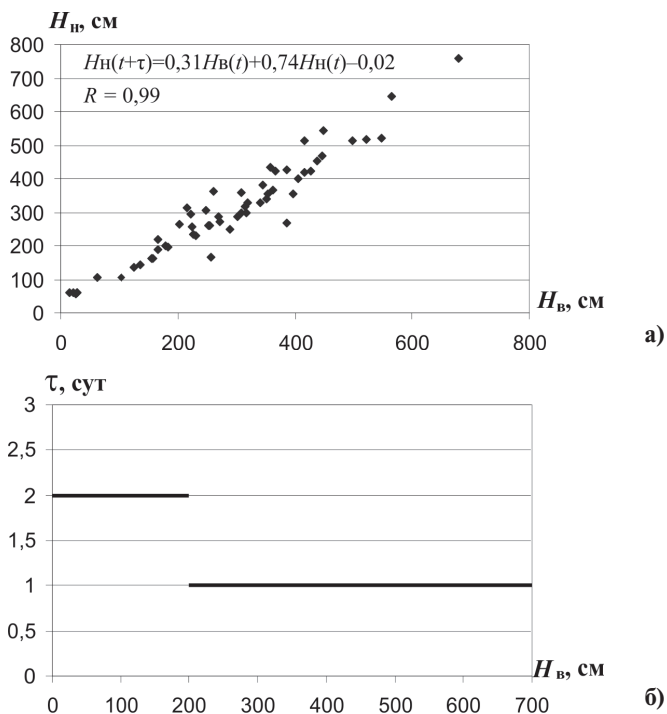
$$H_H(t + \tau) = a_0 + a_1 H_B(t) + a_2 H_H(t), \quad (1)$$

где  $H_B$  – уровень воды на верхнем посту;  $H_H$  – уровень воды на нижнем посту;  $\tau$  – расчетное время добегания;  $a_i$  – коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов.



**Рис. 2. Сеть гидрологических постов, информация которых была использована при построении методик прогноза уровней воды.**

Осреднение данных гидрометрических наблюдений с шагом в сутки приводит к ошибке расчетного времени добегания до  $\pm 1$  сут. Вследствие этого зависимость времени добегания паводка от уровня воды на верхнем посту приобретает характер поля точек, по которому можно выявить лишь тенденцию к уменьшению времени добегания с увеличением высоты паводка. Для получения расчетного времени добегания проводилось осреднение его оценок по определенным интервалам уровня воды. Результат такого осреднения для участка с. Черняево до с. Кумара представлен на рис. 3б. На рис. 3а представлен пример выделенных соответственных уровней воды для участка р. Амур от с. Черняево до с. Кумара.



**Рис. 3. Графики зависимостей для участка р. Амур от с. Черняево до с. Кумара: прогнозных соответственных уровней воды (а); расчетного времени добегания (б).**

Анализ данных соответственных уровней воды показал, что для всех исследуемых участков реки Амур возможно применение описанного выше варианта методики (без учета боковой приточности на участке реки между верхним и нижним постами). Это связано с тесной зависимостью уровней воды верхнего и нижнего поста - на всех участках парный коэффициент корреляции между соответственными уровнями воды больше 0,95, а также с незначительным в большинстве случаев вкладом бокового притока в сток основной реки. В табл. 1 для всех 15 участков реки Амур представлены значения коэффициентов прогнозистических зависимостей  $a_i$ , расчетного времени добегания  $\tau$ , а также длины рядов соответственных уровней.

Таблица 1

**Параметры зависимостей прогноза уровней воды на участках реки Амур  
без учета боковой приточности с заблаговременностью 1–2 суток**

|    | Участок реки                            | $a_0$ | $a_1$ | $a_2$ | $\tau$ , сут                                  | $N$ |
|----|-----------------------------------------|-------|-------|-------|-----------------------------------------------|-----|
| 1  | с. Покровка – с. Джалинда               | 15,2  | 0,51  | 0,59  | 1                                             | 53  |
| 2  | с. Джалинда – с. Черняево               | –30,4 | 0,58  | 0,49  | 1 ( $H_B > 300$ см)<br>2 ( $H_B \leq 300$ см) | 69  |
| 3  | с. Черняево – с. Кумара                 | –0,02 | 0,31  | 0,74  | 1 ( $H_B > 200$ см)<br>2 ( $H_B \leq 200$ см) | 57  |
| 4  | с. Кумара – с. Сергеевка                | –15,9 | 0,42  | 0,67  | 1                                             | 55  |
| 5  | с. Сергеевка –<br>г. Благовещенск       | 7,33  | 0,23  | 0,72  | 1                                             | 62  |
| 6  | г. Благовещенск –<br>с. Константиновка  | 9,63  | 0,23  | 0,80  | 1                                             | 80  |
| 7  | с. Константиновка –<br>с. Иннокентьевка | 0,21  | 0,25  | 0,80  | 1 ( $H_B > 130$ см)<br>2 ( $H_B \leq 130$ см) | 74  |
| 8  | с. Иннокентьевка –<br>с. Пашково        | 159   | 0,68  | 0,49  | 1                                             | 70  |
| 9  | с. Пашково – с. Нагибово                | –20,6 | 0,16  | 0,80  | 1                                             | 61  |
| 10 | с. Нагибово – с. Ленинск                | –30,3 | 0,12  | 0,91  | 1 ( $H_B > 350$ см)<br>2 ( $H_B \leq 350$ см) | 65  |
| 11 | с. Ленинск – г. Хабаровск               | –25,8 | 0,13  | 0,86  | 2                                             | 55  |
| 12 | г. Хабаровск – с. Елабуга               | 3,67  | 0,13  | 0,86  | 1                                             | 43  |
| 13 | с. Елабуга – с. Троицкое                | –9,53 | 0,19  | 0,77  | 1                                             | 44  |
| 14 | с. Троицкое – с. Малмыж                 | 6,94  | –0,19 | 1,16  | 1                                             | 39  |
| 15 | с. Малмыж –<br>г. Комсомольск           | 0,42  | 0,24  | 0,78  | 1                                             | 35  |

В целях получения для основных постов на реке Амур (г. Благовещенск, г. Хабаровск и г. Комсомольск-на-Амуре) прогнозов уровней воды с большей заблаговременностью, было выделено несколько участков с постепенным увеличением расстояния между верхним и нижним постами. Для этих участков отдельно по описанной выше схеме строились методики прогноза. В табл. 2 представлены значения коэффициентов полученных прогностических зависимостей  $a_i$ , расчетного времени добегания  $\tau$ , а также длины рядов соответственных уровней для рассматриваемых участков.

Таблица 2

**Параметры зависимостей прогноза уровней воды для основных постов на реке Амур с увеличенной заблаговременностью (без учета боковой приточности)**

| Участок реки                  | $a_0$ | $a_1$ | $a_2$ | $\tau$ , сут                                  | $N$ |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-----------------------------------------------|-----|
| с. Покровка — г. Благовещенск | −4,72 | 0,64  | 0,47  | 5 ( $H_B > 150$ см)<br>6 ( $H_B \leq 150$ см) | 49  |
| с. Джалинда — г. Благовещенск | −46,3 | 0,58  | 0,58  | 4 ( $H_B > 200$ см)<br>5 ( $H_B \leq 200$ см) | 70  |
| с. Черняево — г. Благовещенск | −12,9 | 0,53  | 0,56  | 3                                             | 69  |
| с. Кумара — г. Благовещенск   | −2,07 | 0,26  | 0,75  | 1 ( $H_B > 320$ см)<br>2 ( $H_B \leq 320$ см) | 54  |
| г. Благовещенск — с. Пашково  | 217   | 0,88  | 0,49  | 3                                             | 68  |
| с. Пашково — г. Хабаровск     | −115  | 0,20  | 0,74  | 4 ( $H_B > 590$ см)<br>5 ( $H_B \leq 590$ см) | 51  |
| с. Нагибово — г. Хабаровск    | −93,0 | 0,25  | 0,75  | 3 ( $H_B > 450$ см)<br>4 ( $H_B \leq 450$ см) | 60  |
| г. Хабаровск — г. Комсомольск | −29,1 | 0,55  | 0,54  | 4                                             | 41  |
| с. Елабуга — г. Комсомольск   | −45,3 | 0,64  | 0,47  | 3                                             | 42  |
| с. Троицкое — г. Комсомольск  | −14,1 | 0,66  | 0,55  | 2                                             | 33  |

Для возможного учета наиболее значительных притоков Амура — рек Зeya и Уссури (река Сунгари не учитывалась из-за асинхронности колебаний ее стока со стоком Амура) — для двух участков реки Амур от г. Благовещенска до с. Константиновка и от г. Ленинска до г. Хабаровска отдельно были построены методики прогноза с учетом боковой приточности. При этом на притоке использовались данные уровней воды в замыкающем створе.

При наличии значительного притока его водность учитывается дополнительно, а схема прогноза усложняется [5]. Для двух выбранных участков была использована прогностическая зависимость вида:

$$H_H(t) = a_0 + a_1 H_B(t - \tau_1) + a_2 H_H(t - \tau_1) + a_3 H_{\Pi}(t - \tau_2), \quad (1)$$

где  $H_B$  — уровень воды на верхнем посту;  $H_H$  — уровень воды на нижнем посту;  $H_{\Pi}$  — уровень воды на притоке;  $\tau_1$  — расчетное время добегающего от верхнего поста до нижнего поста;  $\tau_2$  — расчетное время добегающего от поста на притоке до нижнего поста;  $a_i$  — коэффициенты, определяемые

методом наименьших квадратов. Зависимость такого вида учитывает не только колебания уровней воды на верхних постах основной реки и притока, но и содержит в себе инерционный прогноз.

На участке реки Амур от г. Благовещенска до с. Константиновка, вследствие примерно одинакового расстояния от верхних постов на основной реке и на притоке до нижнего поста, было принято единое время добегания ( $\tau_1 = \tau_2 = 1$  сут). На участке реки Амур от г. Ленинска до г. Хабаровска время добегания  $\tau_1$  и  $\tau_2$  различно, поскольку пост на притоке расположен примерно вдвое ближе, чем верхний пост на основной реке. В табл. 3 представлены значения коэффициентов полученных прогностических зависимостей  $a_i$ , расчетного времени добегания  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , а также длины рядов соответственных уровней.

Таблица 3

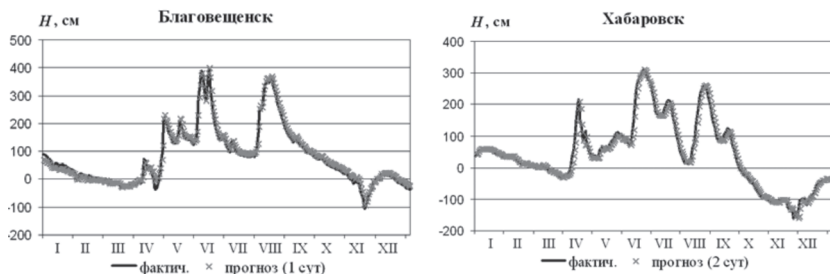
**Параметры зависимостей прогноза уровней воды  
на некоторых приточных участках реки Амур**

| Участок реки                                                         | $a_0$ | $a_1$ | $a_2$ | $a_3$ | $N$ | $\tau_1$ , сут | $\tau_2$ , сут |
|----------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-----|----------------|----------------|
| г. Благовещенск<br>(р. Зея – г. Благовещенск) –<br>с. Константиновка | 28,6  | 0,27  | 0,39  | 0,44  | 67  | 1              | 1              |
| с. Ленинск<br>(р. Усури – с. Новосветское) –<br>г. Хабаровск         | –123  | 0,38  | 0,42  | 0,25  | 25  | 2              | 1              |

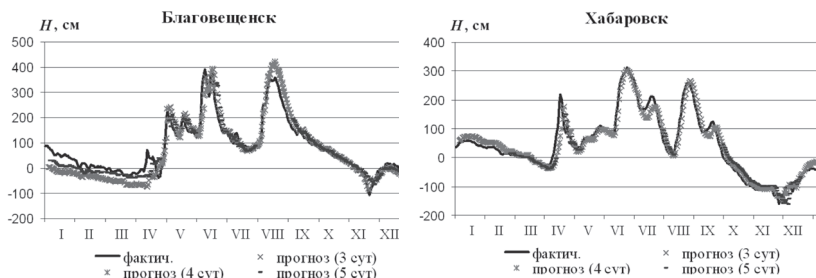
### **Оценка погрешности и эффективности предлагаемых методик прогноза**

Погрешность методики прогноза уровней воды оценивалась на независимом материале [5]. Для этого с использованием рассчитанных параметров зависимостей выпускались проверочные прогнозы уровня для лет, данные которых не использовались для расчета параметров прогностических зависимостей. На рис. 4 приведены совмещенные графики колебаний фактических и спрогнозированных (проверочные прогнозы) уровней воды в створах р. Амур – г. Благовещенск и г. Хабаровск за 2011 г. Для остальных участков реки Амур также имеет место достаточно тесное совпадение фактических и спрогнозированных уровней воды в течение года. При этом с увеличением расстояния между постами отмечается некоторое уменьшение точности прогнозов, о чем свидетельствует меньшее совпадение фактических и спрогнозированных уровней

воды при заблаговременности прогноза более трех суток (рис. 5). Это связано, прежде всего, с неучтенной боковой проточностью, а также с изменяющимся вниз по течению Амура паводочным режимом. В верховьях реки для водного режима Амура характерно чередование отдельных паводков, а в нижнем течении паводки накладываются друг на друга, формируя крупные паводочные волны.



**Рис. 4. Совмещенные графики колебаний фактических и спрогнозированных уровней воды р. Амур – г. Благовещенск и г. Хабаровск за 2011 г.**



**Рис. 5. Совмещенные графики колебаний фактических и спрогнозированных уровней воды р. Амур – г. Благовещенск и г. Хабаровск за 2011 г. при заблаговременности прогноза более трех суток.**

В рамках календарного года наибольшие погрешности прогнозов характерны для зимнего периода и для периода начала весеннего половодья. Неопределенность проверочных прогнозов в холодный период года и в период начала половодья связана с тем, что параметры прогностических зависимостей были рассчитаны с использованием ряда наблюдений за «теплый» период года (с мая по сентябрь). Зимний и

весенний режимы рек значительно отличаются от режима паводочного периода — ледостав, местные питания рек подземными водами в различных частях бассейна, вскрытие рек и ледоход, различные сроки наступления и интенсивность снеготаяния — естественно находят отражение в уменьшении точности проверочных прогнозов в холодный период года.

Использование разработанных методик прогнозирования в оперативном режиме предполагается именно в паводочный период, поскольку летне-осенний период года отличается как количеством паводков, так и максимальными пиками уровней, а следовательно, наибольшей степенью их потенциальной угрозы населению и экономике региона.

В соответствие с принятыми требованиями к точности прогнозов, погрешность прогноза характеризовалась средней квадратической погрешностью  $\sigma_{np}$  его ошибки. При получении оценки  $\sigma_{np}$  использовалась теоретическая формула, которая учитывает не только разности между фактическими и прогнозируемыми уровнями воды, но и соотношение между длиной использованного ряда наблюдений и числом оцениваемых параметров [6]. Формула получения такой оценки имеет вид:

$$\sigma_{np} = \sqrt{\frac{N-1}{(N-k)(N-k-1)} \sum_{j=1}^N (\tilde{H}_j - H_j)^2}, \quad (3)$$

где  $H_j$  — фактическое,  $\tilde{H}_j$  — прогнозируемое значение уровня воды;  $k$  — число оцениваемых параметров прогностической зависимости ( $k = 3-4$ );  $N$  — продолжительность ряда соответственных уровней. Использование данной формулы для оценки погрешности прогноза равнозначно оценке на независимом материале.

Обычно эффективность краткосрочного прогноза определяется соотношением  $\sigma_{np}/\sigma_{\Delta}$ , где  $\sigma_{\Delta}$  характеризует погрешность инерционного прогноза [5]. Для реки Амур, особенно в низовьях, характерно достаточно плавное изменение уровней воды в течение 1–2 суток, вследствие чего погрешность инерционного прогноза  $\sigma_{\Delta}$  мала и становится соизмеримой с погрешностью  $\sigma_{np}$ . Поэтому показатель  $\sigma_{np}/\sigma_{\Delta}$ , особенно при малой заблаговременности прогноза, становится необъективным. В этом случае точность и эффективность прогнозов уровней воды на реке Амур характеризуется квадратом множественного коэффициента корреляции  $R^2$  полученных прогностических зависимостей и соотношением

погрешности прогноза  $\sigma_{np}$  со средним квадратическим отклонением колебаний уровней воды  $\sigma$ . В табл. 4–6 приведены значения продолжительности ряда соответственных уровней  $N$ , квадрата множественного коэффициента корреляции для предлагаемых прогностических зависимостей  $R^2$ , их погрешности  $\sigma_{np}$ , погрешности инерционного прогноза  $\sigma_{\Delta}$ , среднего квадратического отклонения  $\sigma$  колебаний соответственных уровней воды на нижнем посту и отношение  $\sigma_{np}/\sigma_{\Delta}$ .

Таблица 4

**Показатели точности предлагаемых методик прогноза  
с заблаговременностью 1–2 суток (без учета боковой приточности)**

|    | Участок реки                            | $N$ | $R^2$ | $\sigma_{np}$ | $\sigma_{\Delta}$ | $\sigma$ | $\sigma_{np}/\sigma$ |
|----|-----------------------------------------|-----|-------|---------------|-------------------|----------|----------------------|
| 1  | с. Покровка – с. Джалинда               | 53  | 0,94  | 35,0          | 41,4              | 138      | 0,25                 |
| 2  | с. Джалинда – с. Черняево               | 69  | 0,98  | 22,7          | 41,7              | 152      | 0,15                 |
| 3  | с. Черняево – с. Кумара                 | 57  | 0,98  | 20,3          | 25,2              | 151      | 0,13                 |
| 4  | с. Кумара – с. Сергеевка                | 55  | 0,98  | 18,7          | 25,3              | 149      | 0,13                 |
| 5  | с. Сергеевка – г. Благовещенск          | 62  | 0,98  | 19,0          | 20,5              | 115      | 0,17                 |
| 6  | г. Благовещенск –<br>с. Константиновка  | 80  | 0,98  | 12,7          | 14,2              | 162      | 0,08                 |
| 7  | с. Константиновка –<br>с. Иннокентьевка | 74  | 0,98  | 15,4          | 17,5              | 190      | 0,08                 |
| 8  | с. Иннокентьевка – с. Пашково           | 70  | 0,98  | 12,4          | 20,9              | 242      | 0,05                 |
| 9  | с. Пашково – с. Нагибово                | 61  | 0,98  | 12,3          | 12,7              | 189      | 0,07                 |
| 10 | с. Нагибово – с. Ленинск                | 65  | 0,98  | 9,57          | 11,1              | 210      | 0,05                 |
| 11 | с. Ленинск – г. Хабаровск               | 55  | 0,98  | 21,9          | 24,2              | 196      | 0,11                 |
| 12 | г. Хабаровск – с. Елабуга               | 43  | 0,98  | 4,67          | 4,36              | 202      | 0,02                 |
| 13 | с. Елабуга – с. Троицкое                | 44  | 0,98  | 6,34          | 6,62              | 168      | 0,04                 |
| 14 | с. Троицкое – с. Малмыж                 | 39  | 0,98  | 14,6          | 14,1              | 179      | 0,08                 |
| 15 | с. Малмыж – г. Комсомольск              | 35  | 0,98  | 11,6          | 12,5              | 198      | 0,06                 |

Как видно из таблиц, точность прогнозов увеличивается вниз по течению Амура, что, как уже было сказано, связано с характером паводочного режима реки. В верховьях Амура прогноз отдельных паводков менее точен, чем прогноз плавного изменения паводочных волн в нижнем течении. Для самого верхнего участка реки (с. Покровка – с. Джалинда) характерны самые низкие из всех значения квадрата множественного

коэффициента корреляции  $R^2$  и наибольшие погрешности прогноза  $\sigma_{np}$  (табл. 4). Погрешность прогноза уровней воды на участке реки Амур с. Ленинск — г. Хабаровск также несколько повышена по сравнению с другими участками. Связано это со значительным боковым притоком воды на данном участке и, как следствие, переходом от чередования отдельных паводков к чередованию крупных паводочных волн.

С увеличением заблаговременности погрешность прогноза  $\sigma_{np}$  увеличивается (табл. 5). При этом несколько снижаются и коэффициенты множественной корреляции. Тем не менее все построенные методики прогноза уровней воды на реке Амур имеют достаточно высокую точность и эффективность.

Таблица 5

**Показатели точности предлагаемых методик прогноза  
с увеличенной заблаговременностью (без учета боковой приточности)**

| Участок реки                  | $N$ | $R^2$ | $\sigma_{np}$ | $\sigma_{\Delta}$ | $\sigma$ | $\sigma_{np} / \sigma$ |
|-------------------------------|-----|-------|---------------|-------------------|----------|------------------------|
| с. Покровка — г. Благовещенск | 49  | 0,86  | 46,2          | 72,9              | 122      | 0,38                   |
| с. Джалинда — г. Благовещенск | 70  | 0,92  | 41,2          | 64,2              | 150      | 0,28                   |
| с. Черняево — г. Благовещенск | 69  | 0,96  | 35,0          | 53,3              | 158      | 0,22                   |
| с. Кумара — г. Благовещенск   | 54  | 0,98  | 20,7          | 24,4              | 146      | 0,14                   |
| г. Благовещенск — с. Пашково  | 68  | 0,96  | 47,5          | 86,7              | 240      | 0,20                   |
| с. Пашково — г. Хабаровск     | 51  | 0,96  | 36,5          | 43,0              | 193      | 0,19                   |
| с. Нагибово — г. Хабаровск    | 60  | 0,98  | 31,3          | 36,8              | 182      | 0,17                   |
| г. Хабаровск — г. Комсомольск | 41  | 0,98  | 34,4          | 43,8              | 233      | 0,15                   |
| с. Елабуга — г. Комсомольск   | 42  | 0,98  | 34,2          | 42,5              | 237      | 0,14                   |
| с. Троицкое — г. Комсомольск  | 33  | 0,98  | 23,8          | 26,4              | 260      | 0,09                   |

В случае, когда при построении прогностических зависимостей учитывались наиболее крупные притоки, получены следующие результаты. При учете стока р. Зеи точность прогнозов уровней воды с заблаговременностью одни сутки увеличилась, о чем свидетельствует меньшая погрешность прогноза  $\sigma_{np}$ , а при учете стока реки Усури точность прогнозов уменьшилась (табл. 6). Связано это с тем, что посты на реках Зея и Амур (г. Благовещенск) расположены близко друг от друга, и паводки на них проходят синхронно. Посты в с. Ленинск (р. Амур)

и с. Новосоветское (р. Уссури) расположены на достаточном удалении друг от друга, паводки на них проходят менее синхронно и с различным временем добегания до нижнего поста на реке Амур, при этом удалось выделить лишь небольшое число соответственных уровней воды.

Таблица 6

**Показатели точности предлагаемых методик прогноза  
на некоторых приточных участках реки Амур**

| <b>Участок реки</b>                                                  | <b><math>N</math></b> | <b><math>R^2</math></b> | <b><math>\sigma_{пр}</math></b> | <b><math>\sigma_{\Delta}</math></b> | <b><math>\sigma</math></b> | <b><math>\sigma_{пр}/\sigma</math></b> |
|----------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|----------------------------------------|
| г. Благовещенск<br>(р. Зея – г. Благовещенск) –<br>с. Константиновка | 67                    | 0,98                    | 7,41                            | 14,2                                | 162                        | 0,05                                   |
| с. Ленинск<br>(р. Уссури – с. Новосоветское) –<br>г. Хабаровск       | 25                    | 0,98                    | 28,0                            | 28,5                                | 202                        | 0,14                                   |

**Оперативный режим выпуска прогнозов**

Начиная с июля 2014 г. разработанные методики выпуска краткосрочных прогнозов уровней воды на р. Амур были внедрены в оперативный режим работы. С этой целью предварительно было разработано программное обеспечение (с использованием языка программирования *Python* и его библиотек), реализующее разработанные методики, которое затем было встроено в подсистему расчета и выпуска прогнозов бассейновой автоматизированной системы краткосрочного прогнозирования «Амур». Система прогнозирования в полностью автоматическом режиме осуществляет сбор, первичный контроль и обработку всей гидрометеорологической информации, измеряемой на сети станций и постов Росгидромета в бассейне р. Амур, затем осуществляется составление и выпуск краткосрочных прогнозов уровня воды на постах р. Амур. Заключительный этап работы системы прогнозирования осуществляет подсистема визуализации прогнозов и доведение прогностических продуктов (карт, графиков, таблиц) до пользователей с использованием ГИС технологий и сети интернет. Таким образом, ежедневно прогноз уровней воды на р. Амур рассчитывался и передавался в оперативно-прогностическое учреждение Росгидромета, ответственное за выпуск прогнозов в бассейне реки (Гидрометцентр г. Хабаровск).

Для каждого участка реки в период с июля по сентябрь 2014 года была рассчитана оправдываемость полученных прогнозов уровней воды, которая представляет собой процент ошибок прогноза, не превосходящих допустимую ошибку  $0,674\sigma_{\Delta}$ . Для тех участков реки Амур, где наиболее выражен паводочный режим стока, т. е. чередование отдельных паводочных пиков с резким подъемом, а также на участке реки Амур от г. Хабаровска до г. Благовещенска, оправдываемость полученных прогнозов уровней воды максимальна (90–95 %). В среднем течении Амура, где происходит изменение характера паводочного режима, заметно снижается погрешность инерционного прогноза  $\sigma_{\Delta}$ , оправдываемость прогнозов – несколько снижается.

### Заключение

Для 15 участков реки Амур на основе метода соответственных уровней воды были разработаны методики краткосрочного прогноза с заблаговременностью 1–2 суток. В целях увеличения заблаговременности прогнозов еще для десяти более продолжительных участков реки Амур были построены соответствующие методики (заблаговременность до пяти суток). Отдельно были разработаны методики прогноза для двух участков, на которых впадают наиболее значительные притоки Амура – реки Зея и Усури. Проверка прогнозов на независимом материале показала их высокую точность и эффективность.

Разработанные методики краткосрочного прогноза уровня воды на створах р. Амур были внедрены в оперативный режим в июле 2014 года в рамках бассейновой автоматизированной системы выпуска краткосрочных прогнозов паводкового стока в бассейне р. Амур. Составление и выпуск прогнозов осуществлялся полностью в автоматизированном режиме в 01 ч ВСВ. После выпуска прогноза происходило формирование прогностической продукции в виде карт, графиков и таблиц и ее доведение в центр прогнозирования в Гидрометцентре Хабаровска.

В рамках реализации Технического проекта восстановления, модернизации и развития гидрометеорологической сети наблюдений и системы гидрологического прогнозирования в бассейне р. Амур ведутся работы по установке автоматических гидрометрических комплексов на реках бассейна. В связи с этим дальнейшие работы по усовершенствованию методов прогнозирования на р. Амур будут связаны

с использованием учащенных данных гидрологических наблюдений, как на этапе разработки методик, так и в режиме реального времени на этапе выпуска оперативных прогнозов.

### Список литературы

1. *Корень В.И., Бельчиков В.А.* Методические указания по использованию методов краткосрочных прогнозов ежедневных расходов (уровней) воды для речных систем на основе математических моделей. — Л.: Гидрометеиздат, 1989. — 176 с.
2. *Мордовин А.М.* Годовой и сезонный сток рек бассейна Амура. — Хабаровск: Институт водных и экологических проблем ХНЦ ДВО РАН, 1996. — 72 с.
3. *Ресурсы поверхностных вод СССР.* Том 18. Вып. 1. Верхний и Средний Амур. Монография и Основные гидрологические характеристики. — Л.: Гидрометеиздат, 1966. — 781 с.
4. *Ресурсы поверхностных вод СССР.* Том 18. Вып. 2. Дальний Восток. Нижний Амур (от с. Помпеевки до устья). — Л.: Гидрометеиздат, 1970. — 592 с.
5. *Руководство по гидрологическим прогнозам.* Вып. 2. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. — Л.: Гидрометеиздат, 1989. — 245 с.
6. *Христофоров А.В.* Надежность расчетов речного стока. — М.: Изд-во МГУ, 1993. — 166 с.

*Д.А. Бураков, В.Ф. Космакова, Н.П. Волковская*

## **МЕТОДИКА ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА МАКСИМАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ ВОДЫ ДЛЯ р. ОБИ У г. НИЖНЕВАРТОВСКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕЕ ИСПЫТАНИЯ**

Методика разработана в рамках выполнения темы 1.7.49 плана НИР и ОКР Росгидромета в 2011–2013 гг.

В основу физико-статистической модели долгосрочного прогноза максимальных уровней воды с участием заторов льда положены исследования Л.Г. Шуляковского, показавшего возможность использования в кратко- и среднесрочных прогнозах регрессионных моделей [9]. В Сибири накоплен положительный опыт применения различных гидрометеорологических характеристик в регрессионных моделях долгосрочного прогноза максимальных уровней весеннего половодья на реках бассейнов Оби, Енисея и Лены [2, 3]. Репрезентативность отобранных из физических соображений предикторов проверялась на основе корреляции с максимальными уровнями воды, с применением пошаговой регрессии. В расчетах использованы данные наблюдений за последние 30–50 лет.

Отмечено, что атмосферные процессы и связанные с ними процессы весеннего ослабления прочности ледяного покрова и прибыли воды в реках носят инерционный характер, т. е. начальные тенденции их развития характеризуют последующий ход вскрытия реки, включая образование и мощность заторов льда. Так, весеннее потепление и сроки вскрытия рек Сибири определяются главным образом возникновением в марте над этой территорией юго-западного и западного переноса воздушных масс, обуславливающего общее потепление, или сохраняется восточносибирский антициклон с гребнями, направленными на запад

и северо-восток [1, 3]. Циркуляционные «предвестники» раннего или позднего весеннего потепления проявляются еще в феврале-марте. Приблизенно тип весны может характеризовать температура воздуха в марте (декадная, месячная). Например, при низкой температуре марта — начала апреля более вероятна холодная погода в первой половине апреля и последующее интенсивное потепление в конце апреля — начале мая, усиливающее концентрацию весеннего половодья. Теплое начало марта чаще сопровождается растянутым половодьем.

Максимальные уровни воды формируются под влиянием притока воды в русловую сеть, с одной стороны, и факторов, определяющих образование шуголедяных «пробок» в русле, — с другой. Конкретный набор предикторов и вид регрессионных уравнений индивидуальны для каждого участка реки в связи с различием условий образования затворов льда. Все используемые характеристики — это комплексные показатели взаимодействия атмосферы, бассейна и русла [4, 6]. Выделить индивидуальную степень их влияния в общем физическом процессе не всегда удается.

Объем и интенсивность притока воды в русловую сеть определяются запасами снега перед началом снеготаяния и весенними осадками, а также факторами, влияющими на интенсивность снеготаяния.

Раннее наступление тепла в верхнем течении реки по сравнению с участком среднего и нижнего течения способствует развитию заторного характера вскрытия в среднем и нижнем течении. Подобные условия характерны для рек, текущих с юга на север.

Интенсивность последующего подъема уровня воды косвенно связана с его подъемом за предшествующий отрезок времени.

Наконец, продолжительность осеннего ледохода, максимальный уровень в начале ледостава, толщина ледяного покрова характеризуют наличие шуголедяных «пробок» в русле.

Разработанные методики учитывают специфику формирования максимальных уровней воды для заболоченных рек Западно-Сибирской равнины. Репрезентативность отобранных из физических соображений предикторов проверялась на выборке с применением пошаговой регрессии и уточнялась с помощью последующего многовариантного подбора на основе корреляции с максимальными уровнями воды.

По рекомендации Технического совета продолжить испытания методики были скорректированы основные предикторы для прогноза максимального уровня. В современной редакции методики учитываются следующие предикторы:

- показатели снегонакопления в бассейне;
- уровни воды на 10 марта и 10 апреля в пунктах наблюдений, а также температура воздуха в апреле, характеризующие динамику развития весенних процессов;
- характеристики ледостава выше расчетного пункта.

Обозначения переменных (предикторов) представлены в табл. 1. Здесь же даны значения *t*-статистик, равные отношению соответствующего коэффициента регрессии к его среднеквадратичной ошибке [7]. Чем больше *t*-статистика отклоняется по абсолютному значению от единицы, тем надежнее оценка коэффициента регрессии.

Таблица 1

Обозначения переменных в уравнениях (1) и (2)

| Обозначение       | Смысловое значение                                                               | t-статистики коэффициентов регрессии |       |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------|
|                   |                                                                                  | (1)                                  | (2)   |
| <i>S1, S2, X1</i> | <i>S1</i> – максимальный запас воды в снеге (с. Колпашево)                       | 5,03                                 | 4,36  |
|                   | <i>S2</i> – максимальный запас воды в снеге (с. Молчаново)                       | 3,30                                 | 2,91  |
|                   | <i>X1</i> – сумма осадков за январь, февраль, март (с. Степановка)               | 2,53                                 | 2,31  |
| <i>H3, H4, H7</i> | <i>H3</i> – уровень воды на 10 марта, р. Обь – с. Александровское;               | 5,29                                 | 4,64  |
|                   | <i>H4</i> – уровень воды на 10 марта, р. Обь – пгт Каргасок;                     | –1,32                                | –1,13 |
|                   | <i>H7</i> – уровень воды на 10 апреля, р. Обь – г. Колпашево                     | –2,72                                | 2,21  |
| $\Delta T2$       | $\Delta T2$ – дата установления ледостава на участке г. Колпашево – пгт Каргасок | –1,38                                | –1,47 |
| <i>h</i>          | <i>h</i> – максимальная толщина льда в см, р. Обь – пгт Каргасок                 | 2,00                                 | 2,18  |
| <i>t3</i>         | <i>t3</i> – среднемесячная температура воздуха за апрель, с. Александровское     | –2,89                                | –3,10 |

Ниже приведены формулы для прогноза максимальных уровней воды у г. Нижневартовска, коэффициенты их множественной корреляции ( $R$ ):

$$H_{max1} = 1,488 \times S1 + 0,941 \times S2 + 1,163 \times X1 + 1,072 \times H3 - 0,38 \times H4 - 0,32 \times H7 - 1,009 \times \Delta T2 + 0,869 \times h - 5,272 \times t3 + 462,178; \quad (1)$$

показатель точности:  $R = 0,927$ ;

$$H_{max2} = 1,303 \times S1 + 0,906 \times S2 + 1,068 \times X1 + 1,016 \times H3 - 0,33 \times H4 - 0,266 \times H7 - 1,098 \times \Delta T2 + 0,931 \times h - 5,501 \times t3 + 471,659; \quad (2)$$

показатель точности:  $R = 0,911$ .

Результаты прогноза максимальных уровней воды р. Оби у г. Нижневартовска за периоды наблюдений представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты прогноза максимальных уровней воды р. Оби у г. Нижневартовск

| р. Обь – г. Нижневартовск (допустимая ошибка 58 см) |      |                        |         |                        |         |
|-----------------------------------------------------|------|------------------------|---------|------------------------|---------|
| Год                                                 | Факт | Прогноз по формуле (1) | Ошибка* | Прогноз по формуле (2) | Ошибка* |
| 1973                                                | 991  | 1060                   | –69     | 1054                   | –63     |
| 1974                                                | 897  | 849                    | 48      | 851                    | 46      |
| 1975                                                | 988  | 1021                   | –33     | 1008                   | –20     |
| 1976                                                | 780  | 826                    | –46     | 830                    | –50     |
| 1977                                                | 846  | 818                    | 28      | 819                    | 27      |
| 1978                                                | 907  | 897                    | 10      | 899                    | 8       |
| 1979                                                | 1071 | 1076                   | –5      | 1065                   | 6       |
| 1980                                                | 837  | 840                    | –3      | 849                    | –12     |
| 1981                                                | 775  | 762                    | 13      | 770                    | 5       |
| 1982                                                | 750  | 753                    | –3      | 754                    | –4      |
| 1983                                                | 871  | 852                    | 19      | 846                    | 25      |
| 1984                                                | 912  | 935                    | –23     | 933                    | –21     |
| 1986                                                | 900  | 858                    | 42      | 863                    | 37      |
| 1987                                                | 830  | 803                    | 27      | 809                    | 21      |
| 1988                                                | 869  | 822                    | 47      | 831                    | 38      |
| 1989                                                | 737  | 736                    | 1       | 755                    | –18     |
| 1990                                                | 854  | 850                    | 4       | 848                    | 6       |

Таблица 2 (окончание)

| р. Обь – г. Нижневартовск (допустимая ошибка 58 см) |      |                        |         |                        |         |
|-----------------------------------------------------|------|------------------------|---------|------------------------|---------|
| Год                                                 | Факт | Прогноз по формуле (1) | Ошибка* | Прогноз по формуле (2) | Ошибка* |
| 1991                                                | 795  | 871                    | –76     | 864                    | –69     |
| 1992                                                | 790  | 802                    | –12     | 802                    | –12     |
| 1993                                                | 905  | 855                    | 50      | 857                    | 48      |
| 1994                                                | 820  | 822                    | –2      | 827                    | –7      |
| 1995                                                | 695  | 722                    | –27     | 734                    | –39     |
| 1998                                                | 919  | 862                    | 57      | 865                    | 54      |
| 1999                                                | 949  | 930                    | 19      | 924                    | 25      |
| 2000                                                | 815  | 844                    | –29     | 847                    | –32     |
| 2001                                                | 892  | 851                    | 41      | 850                    | 42      |
| 2002                                                | 994  | 953                    | 41      | 961                    | 33      |
| 2003                                                | 864  | 893                    | –29     | 899                    | –35     |
| 2004                                                | 843  | 858                    | –15     | 859                    | –16     |
| 2005                                                | 780  | 808                    | –28     | 813                    | –33     |
| 2006                                                | 789  | 847                    | –58     | 853                    | –64     |
| 2007                                                | 1012 | 958                    | 54      | 955                    | 57      |
| 2008                                                | 836  | 832                    | 4       | 840                    | –4      |
| 2009                                                | 778  | 772                    | 6       | 789                    | –11     |
| 2010                                                | 883  | 868                    | 15      | 878                    | 5       |
| 2011                                                | 816  | 778                    | 38      | 789                    | 27      |
| 2012                                                | 542  | 610                    | –68     | 632                    | –90     |
| 2013                                                | 936  | 940                    | –4      | 940                    | –4      |
| 2014                                                | 878  | 913                    | –35     | 929                    | –51     |
| 2015                                                | 1061 | 1058                   | 3       | 1051                   | 10      |
| 2016                                                | 866  | 804                    | 62      | 822                    | 44      |

*Примечание.* \* – жирным шрифтом выделены ошибки не оправдавшихся прогнозов.

Оценка успешности методов прогноза максимальных уровней воды р. Оби проводилась согласно Методическим указаниям [8].

Из-за ограниченного числа прогнозов в период оперативных испытаний эффективность методик определяется в основном по результатам авторских испытаний на архивных материалах за 2011–2013 гг. и результатам производственных испытаний за 2015–2016 гг. по формуле (1) и 2012–2016 гг. по формуле (2).

Анализ оправдываемости прогнозов максимальных уровней воды р. Оби у г. Нижневартовска по формулам (1) и (2) показал, что в целом за 1973–2016 гг. прогнозы обеспечили хороший результат — оправдываемость прогнозов 95 % (табл. 2). Оценка качества прогнозов максимального уровня р. Оби за весь период наблюдений с 1973 по 2016 г. проводилась согласно Наставлению [5]. По формуле (1)  $S/\sigma = 0,556$ ; по формуле (2)  $S/\sigma = 0,561$ , что говорит, что прогнозы качественные.

Исходя из представленных результатов, Технический совет ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС» от 28.10.2016 г. рекомендовал новые методики долгосрочного прогноза максимальных уровней воды р. Оби у г. Нижневартовска к внедрению в оперативную практику отдела гидрологических прогнозов Гидрометцентра ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС» со статусом основных. ЦМКП Росгидромета от 29.11.2016 г. утвердила данное решение.

### Список литературы

1. *Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д.* Курс гидрологических прогнозов. — Л.: Гидрометеиздат, 1974. — 198 с.
2. *Бужин В.А.* Методы прогнозов зазорных и заторных явлений // Труды V Всесоюзного гидрологического съезда. В 10 т. — Л.: Гидрометеиздат, 1989. — Том 7. Гидрологические прогнозы и предсказания опасных гидрологических явлений. — С. 312–319.
3. *Бураков Д.А., Космакова В.Ф.* Метод прогноза максимальных уровней весеннего половодья р. Томи у г. Томска и результаты его применения на практике // Материалы Международной научно-практической конференции, 16–20 октября 2012 г. — Томск, 2012. — С. 69–71.
4. *Линслей Р., Колер М., Паулюс Д.* Прикладная гидрология. — Л.: Гидрометеиздат, 1962. — 759 с.
5. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 1. Прогнозы режима вод суши. — Л.: Гидрометеиздат, 1962. — 193 с.
6. *Попов Е.Г.* Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. — М.: Гидрометеиздат, 1963. — 395 с.
7. *Рождественский А.В., Чеботарев А.И.* Статистические методы в гидрологии. — Л.: Гидрометеиздат, 1974. — 424 с.
8. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — 150 с.
9. *Шуляковский Л.Г., Еремина В.А.* К методике прогноза заторных уровней воды // Метеорология и гидрология. — 1952. — № 1. — С. 46–51.

*А.А. Косторная, М.Г. Захватов, Ю.В. Токарева*

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ МЕТОДИКИ ДЕШИФРИРОВАНИЯ ОБЛАЧНОГО ПОКРОВА ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ**

### **Введение**

Выделение и определение типов облачности на исходных космических изображениях — непростая задача. В руководящем документе РД 52.27.339-93 определены общие правила использования спутниковых изображений для диагноза и прогноза опасных и особо опасных осадков, града и шквалов. Согласно этому документу, основными дешифровочными признаками, позволяющими различать изображение облаков разного типа, являются тон и рисунок изображения [7]. Для дешифрирования облачности на спутниковом изображении специалист-метеоролог должен обладать глубокими знаниями, применять вспомогательные материалы, а также понимать региональные климатические особенности. Но и в этом случае не исключены ошибки визуальной интерпретации снимка из-за неверного восприятия изображения.

Закономерный шаг в развитии спутниковой метеорологии — автоматизация процесса дешифрирования космических снимков облачности [4, 5]. Первые технологии автоматического восстановления количественных характеристик облачного покрова имели низкую оправдываемость ввиду отсутствия учета физических процессов, протекающих в атмосфере. Последующие исследования и наработки в области динамики и физики атмосферы (в том числе микрофизики облаков и осадков) и развитие космической техники способствовали созданию современных научных алгоритмов, позволяющих с хорошей достоверностью детектировать облачность и оценивать ее параметры.

### Краткое описание методики

Методика дешифрирования облачности и расчета ее характеристик позволяет предоставлять специалистам тематические продукты на основе спутниковых данных — карты классификации облачности, высоты (км) и температуры (°C) верхней границы облаков (ВГО). Предикторами являются измеренные спутниковым радиометром спектральные характеристики объектов. Кроме того, используется значительный объем дополнительных данных: численный прогноз погоды NCER, цифровые маски водоемов, пустынь и т. п.

Процесс дешифрирования облачного покрова методикой многоэтапный: при поступлении спутниковой информации происходит последовательный запуск алгоритмов, выполняющих классификацию и восстановление количественных характеристик облачности.

На первом этапе производится обнаружение облачности; построение маски облачности. Алгоритм построения маски облачности основан на байесовском классификаторе, после выполнения которого с помощью пороговых значений апостериорной вероятности формируется четырехуровневая маска облачности со значениями: ясно, возможно ясно, облачно и возможно облачно [8].

После процедуры обнаружения облачности запускается алгоритм определения типа облачности и ее фазового состояния. Каждый пиксель изображения классифицируется в одну из семи категорий: туман, облака капельно-жидкого строения (подразделяются на «теплые» и «холодные» по значениям яркостной температуры в канале прозрачности атмосферы 11 мкм), облака смешанного строения (состоящие из воды и льда), облака конвекции (развитые по вертикали облака с большой оптической толщиной), многослойная облачность (высоко расположенные облака над более низкими ярусами) и перистая облачность (прозрачная кристаллическая облачность с малой оптической толщиной).

Третий этап определяет характеристики облачности: высоту и температуру ВГО. Расчет производится только для пикселей, ранее определенных как облачные. Используя измеренное радиометром уходящее тепловое излучение в каналах прозрачности атмосферы (11 и 12 мкм), происходит восстановление значений температуры ВГО с помощью регрессионной зависимости.

На следующем этапе происходит определение оптических и микрофизических свойств облака на пикселях дневного периода. Такими в алгоритме считаются пиксели с солнечным зенитным углом  $\leq 65^\circ$ . Алгоритм основан на стандартном биспектральном подходе к оценке величин оптической толщины облака и эффективного радиуса частиц, используя каналы 0,65 и 3,7 мкм. Значения параметров восстанавливаются на основе регрессионной зависимости. Входными данными алгоритма являются атмосферные профили NCER (температура, содержание водяного пара и озона по высотам), результаты расчетов прошлых алгоритмов (облачная маска, информация о фазовом состоянии облака и температуре его верхней границы) и таблицы априорных значений оптических параметров облака (коэффициенты излучения, отражения и пр.). Оптические и микрофизические свойства облачности дают важную информацию о степени ее развития и мощности [8].

Завершающий этап производит подробную морфологическую классификацию облачности с помощью порогового метода, который в качестве входных параметров использует выходные данные предыдущих этапов выполнения методики. При создании алгоритма классификации использовалась информация ВМО об основных типах облачности и их подвидах, пороговые значения величин высоты облачности брались из справочной литературы [6], а также с учетом пороговых значений и разделений классов облачности методикой Е.В. Волковой [2, 3].

Выделенные классы облачности несколько отличаются от принятых в других методиках дешифрирования облачного покрова. Данное обстоятельство вызвано особенностью дешифрирования спутниковой информации данной методикой. Полученные классы облачности и соответствующие им типы приведены в табл. 1.

### **Методика испытаний**

Методика дешифрирования облачности реализована на данных спутников NOAA-19, NOAA-18, NOAA-15 и MetOp-B, позволяющих создать продукцию по испытываемой методике 24 раза в сутки с запаздыванием не более 15 минут от срока съемки. Продукты, получаемые методикой, сопоставлялись с аналогичными данными, полученными радиолокационным методом на основе доплеровского метеолокатора.

Таблица 1

## Классификация облачности

| Обозначение класса облачности на карте | Ci+Cb                                                                                          | Ci+med                                                                                    | Ci; Cs; Cc                                                            | As; Cu                                                      | Sc; Cu                                                 |
|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Описание типов облачности              | Многослойная облачность, верхний ярус (Ci, Cs) над облачным слоем более низкого яруса (Cu, Ns) | Многослойная облачность, верхний ярус (Ci) над средним или нижним ярусом (St, As, Sc, Ac) | Класс перистообразных (Ci, Cs, Cc)                                    | Преимущественно As, отдельные мало-мощные Cu или плотные As | Преимущественно Sc, небольшой мощностью Cu и иногда As |
| Обозначение класса облачности на карте | Ns; Cb                                                                                         | St; As                                                                                    | Low+As                                                                | Cb cap;<br>Cb calv                                          | Cb inc                                                 |
| Описание типов облачности              | Ns, мощные Cu cong., Cb hum                                                                    | As (в теплое время года), St, Sc, низкие Ac                                               | Многослойная облачность, нижний ярус – Ns, St, Sc, Cu под As, реже Ac | Помимо Cb cap и Cb calv, мощные Cu cong                     | Кучево-дождевые облака с наковальной                   |

Испытание продуктов методики проводилось Западно-Сибирским филиалом ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» с 1 июня 2015 г. по 11 мая 2016 г. Учитывая особенности и ограничения радиолокационного метода, привлекалась вспомогательная информация: синоптические карты погоды, карты нефанализа и данные бортовой погоды. Сравнению подвергались параметры облачности над территорией обзора Барабинского ДМРЛ-С. Карты классификации облачности и высоты верхней границы облачности, полученные на основе информации со спутников NOAA-19, NOAA-18, NOAA-15 и MetOp-B в сроки, наиболее близкие к времени пролета спутника над территорией наблюдения, сравнивались с данными ДМРЛ-С. В сводной таблице дежурным синоптиком указывались дата и время сеанса, спутник, средние значения высот по территории охвата ДМРЛ-С (или интервалы высот), рассчитанные методикой и определенные ДМРЛ-С. При сравнении учитывалось, что границы массивов облачности на картах дешифрирования могут отличаться от данных ДМРЛ-С по причине различного пространственного разрешения выходной продукции.

Проводилось сравнение типов облачности и высоты верхней границы облачности, как по отдельности независимо друг от друга, так и в совокупности (должно быть наличие обоих продуктов методики в рассматриваемый срок). 1 – присваивалась при полном совпадении данных методики и данных ДМРЛ-С, 0 – при полном расхождении данных методики и данных ДМРЛ-С.

Дополнительная оценка точности расчета методикой параметров ВГО (высоты и температуры) была проведена на основе лидара CALIOP KA CALIPSO. Данная оценка рассматривалась как авторское испытание. Лидар CALIOP позволяет получать вертикальные профили рассеяния излучения от облачности и количественные параметры обнаруженных облачных и аэрозольных слоев [8, 9]. Для проведения сравнения использовались данные лидара в форматах level1 и level2, а исходными данными испытываемой методики были данные радиометра AVHRR KA NOAA-19.

### **Результаты испытаний**

С целью определения степени достоверности конечных продуктов методики были проведены разнохарактерные оценки качества ее результатов.

Первичная оценка качества рассчитанных параметров проводилась на основе данных наземной наблюдательной сети с помощью приземных карт погоды за ближайшие сроки. В глобальном масштабе оценивалась точность обнаружения методикой облачности холодных фронтов первого и второго рода, фронтов окклюзии, теплых секторов циклонов, циклонов в различных стадиях развития, высотных ложбин и гребней, выявленных по синоптическим картам. В мезомасштабе с данными методики сравнивались типы и формы облачности, указанные на станциях наблюдателями, а также привлекались косвенные признаки облачности (зоны осадков различной интенсивности, гроз, шквалов и пр.). Продукты методики при сопоставлении с данными метеонаблюдений показали высокую достоверность: на картах дешифрирования прослеживаются основные барические образования, наиболее мощная облачность наблюдается вдоль линий фронтов, типы облачности в большинстве случаев совпадают с наблюдаемыми на станциях, кучево-дождевым формам облачности соответствуют области осадков и пр.

Период испытаний составил 346 дней. Сравнению подверглись данные за 212 дней. Сравнение не проводилось в случае: отсутствия облачности (ясная погода) над территорией наблюдения ДМРЛ-С в момент анализа (108 дней); отсутствия данных методики / ДМРЛ-С (12 дней); по каким-либо другим причинам (14 дней). Подробней сведения о выборке данных представлены в табл. 2 и 3.

Было произведено 546 сравнений данных по высоте ВГО и 384 сравнения классификации облачности (т. е. было произведено 384 сравнений продуктов в совокупности). Для алгоритма классификации облачности необходима информация в каналах 0,6 и 3,7 мкм, доступных только в дневное время при зенитном угле Солнца не более 65°. Продолжительность светового дня в зимние месяцы составляет не более 7–9 часов. В 162 сроках (из 546, т. е. в 30 % данных) информация в дневных каналах отсутствует, а следовательно, отсутствуют и карты классификации облачности, поэтому проанализированных данных по классификации облачности меньше, чем по ВГО.

За весь анализируемый период количество сроков с соответствием данных методики данным ДМРЛ-С (наличие и совпадение двух продуктов методики — ВГО и типизации) составляет 83,1 % от числа сроков с сравнением (319 из 384 сроков).

Таблица 2

Сведения о выборке данных дешифрирования облачности по спутниковым данным, используемых в оперативных испытаниях в период июнь 2015 – май 2016 гг.

| Период испытаний (месяц) | Общее количество дней в месяце, доступных для проведения анализа | Количество дней / %                 |                                                                |                                                                                      |                                                |                                                  |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
|                          |                                                                  | с проведенным сравнением облачности | с непроведённым сравнением облачности по причине ее отсутствия | с непроведённым сравнением облачности по причине отсутствия данных методики / ДМРЛ-С | с непроведённым сравнением по другим причинам* | общее количество дней с непроведённым сравнением |
| июнь                     | 30                                                               | 30 / 100                            | 0 / 0                                                          | 0 / 0                                                                                | 0 / 0                                          | 0 / 0                                            |
| июль                     | 31                                                               | 23 / 74                             | 7 / 23                                                         | 1 / 3                                                                                | 0 / 0                                          | 8 / 26                                           |
| август                   | 31                                                               | 23 / 74                             | 8 / 26                                                         | 0 / 0                                                                                | 0 / 0                                          | 8 / 26                                           |
| сентябрь                 | 30                                                               | 21 / 70                             | 9 / 30                                                         | 0 / 0                                                                                | 0 / 0                                          | 9 / 30                                           |
| октябрь                  | 31                                                               | 25 / 81                             | 6 / 19                                                         | 0 / 0                                                                                | 0 / 0                                          | 6 / 19                                           |
| ноябрь                   | 30                                                               | 13 / 43                             | 12 / 40                                                        | 2 / 7                                                                                | 3 / 10                                         | 17 / 57                                          |
| декабрь                  | 31                                                               | 13 / 42                             | 12 / 39                                                        | 2 / 6                                                                                | 4 / 13                                         | 18 / 58                                          |
| январь                   | 31                                                               | 11 / 35                             | 18 / 58                                                        | 2 / 6                                                                                | 0 / 0                                          | 20 / 65                                          |
| февраль                  | 29                                                               | 10 / 34                             | 11 / 38                                                        | 5 / 17                                                                               | 3 / 10                                         | 19 / 66                                          |
| март                     | 31                                                               | 14 / 45                             | 16 / 52                                                        | 0 / 0                                                                                | 1 / 3                                          | 17 / 55                                          |
| апрель                   | 30                                                               | 23 / 77                             | 6 / 20                                                         | 0 / 0                                                                                | 1 / 3                                          | 7 / 23                                           |
| май                      | 11                                                               | 6 / 55                              | 3 / 27                                                         | 0 / 0                                                                                | 2 / 18                                         | 5 / 45                                           |
| общее количество         | 346                                                              | 212 / 61                            | 108 / 31                                                       | 12 / 3                                                                               | 14 / 4                                         | 134 / 39                                         |

Примечание. \* – повышенная загруженность смены синоптиков, либо технические неполадки рабочего компьютера синоптика.

Таблица 3

**Таблица сопряженности для оценки результатов дешифрирования облачности (наличие, отсутствие) по спутниковым данным методикой в период июнь 2015 г. — май 2016 г.**

| Данные методики<br>(количество дней)           |                          | Данные ДМРЛ-С (количество дней) |                          |                      | Отсутствие<br>данных<br>по другим<br>причинам* | Сумма |
|------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------|--------------------------|----------------------|------------------------------------------------|-------|
|                                                |                          | наличие<br>облачности           | отсутствие<br>облачности | нет данных<br>(сбои) |                                                |       |
| Данные методики<br>(количество дней)           | наличие<br>облачности    | 212                             | 0                        | 10                   | 0                                              | 222   |
|                                                | отсутствие<br>облачности | 0                               | 108                      | 0                    | 0                                              | 108   |
|                                                | нет данных<br>(сбои)     | 2                               | 0                        | 0                    | 0                                              | 2     |
| Отсутствие<br>данных<br>по другим<br>причинам* |                          | 0                               | 0                        | 0                    | 14                                             | 14    |
| Сумма                                          |                          | 214                             | 108                      | 10                   | 14                                             | 346   |

*Примечание.* \* — повышенная загруженность смены синоптиков, либо технические неполадки рабочего компьютера синоптика.

Количество сроков с расхождением в данных составляет 1,3 % (5 из 384 сроков). Типы облачности на картах классификации методики совпадают с типами облачности ДМРЛ-С в 96,9 % случаев. Оправдываемость ВГО — 80,2 %. Более подробные результаты сравнения представлены в табл. 4.

Результаты испытаний показали, что в переходные сезоны и летний период (март—октябрь) данные дешифрирования по методике согласуются с данными радиолокационных наблюдений без существенных отклонений (оправдываемость до 98—100 %). Точность расчета параметров облачности уменьшается при падении температуры воздуха у подстилающей поверхности и установлении снежного покрова, затрудняющего обнаружение облачности. В среднем на 6 % уменьшается точность определения типов облачности и на 19 % точность определения параметров ВГО.

В рамках испытаний при сравнении с данными ДМРЛ-С был проведен анализ синоптических условий, при которых отмечается

Таблица 4

Результаты сравнения данных дешифрирования облачности (ВГО и типизации облачности) методикой с данными ДМРЛ «Барабинск» по месяцам в период испытаний июнь 2015 г. – май 2016г.

| Период испытаний, месяц | Количество дней / сроков сравнения | Оправдываемость при сравнении с данными ДМРЛ-С |                                       |                         |                                       | Оправдываемость при сравнении с данными ДМРЛ-С в совокупности ВГО и типизации облачности |                                              |                                                | Количество сроков с ложной облачностью / % |
|-------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------|
|                         |                                    | ВГО                                            |                                       | типизации облачности    |                                       | ности                                                                                    |                                              |                                                |                                            |
|                         |                                    |                                                |                                       |                         |                                       |                                                                                          |                                              |                                                |                                            |
|                         |                                    | общее количество сроков                        | количество сроков / % с соответствием | общее количество сроков | количество сроков / % с соответствием | количество сроков / % с соответствием                                                    | количество сроков / % с полным соответствием | количество сроков / % с полным несоответствием |                                            |
| Июнь                    | 30 / 74                            | 74                                             | 58 / 78                               | 74                      | 71 / 96                               | 56 / 76                                                                                  | 1 / 1                                        | 0 / 0                                          |                                            |
| Июль                    | 23 / 62                            | 62                                             | 48 / 77                               | 62                      | 57 / 92                               | 44 / 71                                                                                  | 1 / 2                                        | 0 / 0                                          |                                            |
| Август                  | 23 / 65                            | 65                                             | 61 / 94                               | 65                      | 64 / 98                               | 60 / 92                                                                                  | 0 / 0                                        | 0 / 0                                          |                                            |
| Сентябрь                | 21 / 57                            | 57                                             | 47 / 82                               | 42                      | 42 / 100                              | 39 / 93                                                                                  | 0 / 0                                        | 0 / 0                                          |                                            |
| Октябрь                 | 25 / 60                            | 60                                             | 45 / 75                               | 30                      | 30 / 100                              | 25 / 83                                                                                  | 0 / 0                                        | 0 / 0                                          |                                            |
| Ноябрь                  | 13 / 34                            | 34                                             | 22 / 65                               | 11                      | 10 / 91                               | 7 / 64                                                                                   | 1 / 9                                        | 0 / 0                                          |                                            |
| Декабрь                 | 13 / 28                            | 28                                             | 22 / 79                               | 8                       | 7 / 88                                | 7 / 88                                                                                   | 1 / 12                                       | 3 / 0,5                                        |                                            |
| Январь                  | 11 / 25                            | 25                                             | 12 / 48                               | 10                      | 9 / 90                                | 5 / 50                                                                                   | 1 / 10                                       | 4 / 0,7                                        |                                            |
| Февраль                 | 10 / 22                            | 22                                             | 15 / 68                               | 6                       | 6 / 100                               | 5 / 83                                                                                   | 0 / 0                                        | 2 / 0,4                                        |                                            |
| Март                    | 14 / 29                            | 29                                             | 26 / 90                               | 16                      | 16 / 100                              | 16 / 100                                                                                 | 0 / 0                                        | 0 / 0                                          |                                            |
| Апрель                  | 23 / 65                            | 65                                             | 63 / 97                               | 45                      | 45 / 100                              | 44 / 98                                                                                  | 0 / 0                                        | 0 / 0                                          |                                            |
| Май                     | 6 / 25                             | 25                                             | 19 / 76                               | 15                      | 15 / 100                              | 12 / 80                                                                                  | 0 / 0                                        | 0 / 0                                          |                                            |

«ложное» детектирование облачности. На текущий день автоматической системой дешифрирования облачности не решена проблема «ложного» детектирования в зимний период. Низкие значения температуры заснеженной поверхности создают сложности для алгоритма построения маски облачности, так как снежный покров имеет высокое альбедо и может быть ошибочно принят за облачность. Выявлены условия погоды, при которых методика имеет тенденцию к ложному детектированию облачности в зимний период:

- при температурах воздуха у подстилающей поверхности ниже  $-21^{\circ}\text{C}$  (особенно при резких ночных понижениях) в антициклонах, сформированных в холодных воздушных массах;

- при туманах, возникающих вследствие понижения температуры воздуха у подстилающей поверхности ниже  $-13^{\circ}\text{C}$ ;

- при метелях и поземках, охватывающих большие территории, в отсутствии облачности.

Повторяемость сроков с дешифрированием ложной облачности составляет 1,6 % (9 сроков из 546) от общего числа произведенных наблюдений (табл. 4).

Авторские испытания по оценке точности восстановления параметров ВГО с данными КА CALIPSO были проведены в дни тандемной съемки над территорией России спутников CALIPSO и NOAA-19 в 2014 году.

КА CALIPSO был запущен на орбиту в 2006 году для изучения влияния облачности и аэрозолей на излучение Земли и ее климата. Он летает в составе международного «созвездия» («A-train») с пятью другими спутниками (Aqua, CloudSat, PARASOL, Aura, Glory) для осуществления параллельных наблюдений за Землей. Спутник CALIPSO включает в себя три прибора: облачно-аэрозольный лидар с ортогональной поляризацией (CALIOP) для получения вертикальных профилей рассеяния от облачности и для описания распределения в ней водяного пара, аэрозолей и т.д.; ИК-радиометр (IIR) и широкоугольную камеру высокого разрешения (WFC) [10,11].

Зарубежные космические (NASA, ESA, JAXA) и метеорологические агентства (NOAA) на регулярной основе производят валидацию измерений лидара CALIOP с применением наземных и самолетных измерений. В качестве наземных измерений используется лидарная сеть GALION.

Лидар CALIOP обладает высокими техническими показателями: вертикальное разрешение составляет 30 метров, а горизонтальное достигает одного километра в диапазоне высот от  $-0,5$  до 20 километров [9].

При сравнении методика показала достаточно высокую оправдываемость обнаружения как нескольких слоев облачности, так и отдельных единичных облачных образований. Наибольшая точность расчета параметров ВГО (высоты и температуры) прослеживается у слоистообразной и кучевообразной облачности, наименьшая — у перистых типов. В целом по сезонам максимальная оправдываемость восстановленных параметров ВГО отмечается в теплый период года с апреля по сентябрь с расхождениями в значениях высоты не более 1,5 км, а температуры не более 5—10 градусов Кельвина, что согласуется с результатами испытания на основе доплеровского метеолокатора. Подробное описание результатов испытания методики с данными КА CALIPSO в статье не приводится из-за значительного объема. Подробно ознакомиться с методикой и результатами испытания можно в научно-исследовательском отчете «Валидация продуктов программного комплекса CLAVR-x» [1].

### **Рекомендации к внедрению**

ЦМКП Росгидромета в своем решении от 11.10.2016 г. рекомендовала внедрить метод дешифрирования облачного покрова и получения высоты верхней границы облачности в оперативную практику СЦ ФГБУ «НИЦ «Планета» в качестве основного.

### **Заключение**

Методика позволяет с высоким пространственным разрешением и достаточно достоверно детектировать облачность и определять ее количественные характеристики (ВГО и тип облачности) в автоматическом режиме. Высокая скорость обработки исходных спутниковых данных позволяет получать дешифрованную информацию об облачности в автоматическом режиме через 15 минут после ее приема с КА. За сутки обрабатывается до 24 зарегистрированных сеансов. Большим преимуществом методики является возможность проведения анализа облачного покрова над большей частью территории России независимо от времени года и суток.

В ходе проведенных испытаний тематические продукты методики — карты классификации облачности, высоты и температуры ВГО — показали способность к обнаружению грозových ячеек, к отслеживанию их перемещения, развития и трансформации, а также к оценке мощности облачных образований и степени их опасности. Установлены средние значения оправдываемости конечных продуктов методики: для типов облачности порядка ~97 %, для ВГО около 80 %. Выявлены месяцы (апрель—сентябрь) с наибольшей оправдываемостью восстановленных параметров облачности. Повторяемость «ложного» детектирования облачности — 1,6 % случаев. Выявлены синоптические условия «ложного» детектирования облачности.

Результаты дешифрирования облачного покрова могут использоваться как дополнение к данным синоптических и радиолокационных наблюдений в региональных и мезомасштабных схемах численного анализа и прогноза погоды, а также для целей краткосрочного прогноза состояния облачного покрова в метеорологических службах и в аэропортах. Важной областью применения продукции дешифрирования являются климатические исследования облачного покрова и осадков. Количественные характеристики облачности важны при проведении научных исследований в целях изучения особенностей процессов, происходящих в атмосфере, как в рассматриваемом регионе, так и в конкретном пункте.

Дальнейшее развитие методики представляется не только в улучшении визуализации конечных продуктов, но и планируется создание новых продуктов для обеспечения потребителей информацией о зонах осадков и их интенсивности.

### Список литературы

1. Антонов В.Н., Захватов М.Г., Косторная А.А. Обзор технологии получения карт облачных продуктов на основе данных AVHRR. Валидация первичных результатов с использованием синоптической информации и данных CALIPSO // Сборник трудов Всероссийской конференции «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов», Усть-Сем, 2015г. — С. 146—151.

2. Волкова Е.В. Определение типа облачности по данным измерений радиометра AVYRR ИСЗ NOAA для Европейского региона России в теплый период года // Труды НИЦ «Планета». — 2005. — Вып. 1(46). — С. 22—41.

3. *Волкова Е.В., Успенский А.Б.* Детектирование облачности и выделение зон осадков регионального масштаба по данным полярно-орбитальных метеорологических ИСЗ // Метеорология и гидрология. — 2002. — № 4. — С. 15–25.
4. *Гарбук С.В., Гершензон В.Е.* Космические системы дистанционного зондирования Земли. — М.: Издательство А и Б, 1997. — 296 с.
5. *Герман М.А.* Спутниковая метеорология. Основы космических методов исследования в метеорологии. — Л.: Гидрометеоиздат, 1975. — 366 с.
6. *Мазин И.П., Хргиан А.Х.* Облака и облачная атмосфера. — Л.: Гидрометеоиздат, 1989. — 646 с.
7. РД 52.27.339-93. Руководство по диагнозу и прогнозу опасных и особо опасных осадков, града и шквалов по данным метеорологических радиолокаторов и искусственных спутников Земли. — 180 с.
8. *Heidinger A.* The clouds from AVHRR Extended User's Guide. Version 5.4.1. — NOAA/NESDIS Center for Satellite Applications and Research (STAR). — 2014. — 60 с.
9. *Heidinger A.K., Evan A.T., Foster M.J., Walther A.* A naive Bayesian cloud-detection scheme derived from CALIPSO and applied within PATMOS-x // J. Applied Meteor. Clim. — 2012. — Vol. 51, Is. 6. — С. 1129–1144.
10. *Kacenelenbogen M., Vaughan M.A. et al.* An accuracy assessment of the CALIOP/CALIPSO version 2/version 3 daytime aerosol extinction product based on a detailed multi-sensor, multi-platform case study // Atm. Chem. Phys. — 2011. — Vol. 11, Is. 8. — P. 3981–4000.
11. *Winker D., Vaughan M., Omar A., Hu Y., Powell K.* Overview of the CALIPSO Mission and CALIOP Data Processing Algorithms // J. Atm. Ocean. Tech. — 2009. — Vol. 26. — С. 2310–2323.

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Рочева Э.В.</i> Методика «Мониторинг изменений климата земного шара: приземная температура» и результаты ее испытания .....                                                                                                   | 3   |
| <i>Бирман Б.А., Багров А.Н., Краюшкин Ю.А., <span style="border: 1px solid black; padding: 0 2px;">Балашова Е.В.</span></i> Технология экспресс-мониторинга климатических аномалий температуры воздуха и результаты ее испытаний .....                      | 12  |
| <i>Ривин Г.С., Розинкина И.А., Багров А.Н., Блинов Д.В., Кирсанов А.А., Кузьмина Е.В., Шатунова М.В., Чумаков М.М., Алферов Д.Ю., Бундель А.Ю., Зайченко М.Ю., Никитин М.А.</i> Мезомасштабная модель COSMO-Ru2 и результаты ее оперативных испытаний ..... | 25  |
| <i>Вильфанд Р.М., Васильева Е.Л., Мищенко С.Л., Лукьянов В.И., Голубев А.Д., Васильев П.П.</i> Метод прогноза опасного природного явления – аномально жаркой погоды – на 48–144 часа для территории России и результаты его испытания .....                 | 56  |
| <i>Псаломщикова Л.М., Акентьева Е.М.</i> Методика определения высоты слоя свежевыпавшего снега по данным автоматических осадкомеров OTT Pluvio <sup>2</sup> 200 и метеостанций на территории Санкт-Петербурга и ближайших пригородов .....                  | 68  |
| <i>Старостина Т.В., Ковригина И.Г.</i> Результаты испытания методов прогноза урожайности однолетних и многолетних трав по Новосибирской, Кемеровской областям и Алтайскому краю .....                                                                       | 79  |
| <i>Клячкин С.В., Гузенко Р.Б., Май Р.И.</i> Результаты испытаний метода среднесрочного численного прогноза ледовых условий для летнего и зимнего периодов в Баренцевом и Карском морях заблаговременностью 1–7 суток .....                                  | 89  |
| <i>Карклин В.П., Хотченков С.В., Юлин А.В.</i> Метод долгосрочного прогноза типа ледовых условий в зимний период для районов Карского моря .....                                                                                                            | 113 |
| <i>Мысленков С.А., Столярова Е.В., Архипкин В.С.</i> Система прогноза ветрового волнения в Черном море с детализацией в шельфовых зонах .....                                                                                                               | 126 |
| <i>Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В., Юмина Н.М.</i> Краткосрочное прогнозирование уровней воды на реке Амур .....                                                                                                                                  | 136 |
| <i>Бураков Д.А., Космакова В.Ф., Волковская Н.П.</i> Методика долгосрочного прогноза максимальных уровней воды для р. Оби у г. Нижневартовска и результаты ее испытания .....                                                                               | 152 |
| <i>Косторная А.А., Захватов М.Г., Токарева Ю.В.</i> Результаты испытания методики дешифрирования облачного покрова по спутниковым данным .....                                                                                                              | 158 |

**Методика «Мониторинг изменений климата земного шара: приземная температура» и результаты ее испытания** / Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Рочева Э.В. // Информационный сборник № 44. — 2017. — С. 3—11.

Рассматривается методика мониторинга изменений климата земного шара (подсистема: приземная температура) и реализующая ее технология мониторинга, разработанные в ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН». Разработка предусмотрена планами НИР и ОКР Росгидромета на 2014—2016 гг. (см. НИР 1.3.1.2 «Мониторинг изменений и изменчивости глобального климата (температура воздуха) по данным наблюдений и реанализа»). В соответствии с результатами оперативных испытаний технологии в течение 2016 г., оценки аномальности приземного температурного режима над сушей земного шара и текущих тенденций в его изменении по данным ИГКЭ хорошо согласуются с публикуемыми оценками ВМО и ведущих мировых метеорологических центров. В частности, различия в оценках по данным ИГКЭ (по предлагаемой методике) и по всемирно признанным данным и методике Великобритании, как правило, составляют менее  $0,1^{\circ}\text{C}$  для аномалий и не более  $0,01^{\circ}\text{C}/10$  лет для трендов.

*Ключевые слова:* климат, мониторинг климата, изменение климата, приземная температура, климатическая аномалия, тренд, глобальное потепление, приповерхностная температура.

Табл. 3. Ил. 1. Библ. 5.

**Технология экспресс-мониторинга климатических аномалий температуры воздуха и результаты ее испытаний** / Бирман Б.А., Багров А.Н., Краюшкин Ю.А. Балашова Е.В. // Информационный сборник № 44. – 2017. – С. 12–24.

Приведено описание созданной в ФГБУ «Гидрометцентр России» технологии экспресс-мониторинга климатических аномалий температуры воздуха по Северному полушарию Земли на основе данных SYNOP и CLIMAT. Технология позволяет в течение 2–5 дней после завершения соответствующего временного периода (месяц, сезон, год) получить и при необходимости представить в органы государственной власти и иным потребителям информацию об экстремальности крупномасштабных климатических аномалий температуры воздуха по Северному полушарию Земли за прошедший период времени.

*Ключевые слова:* экспресс-мониторинг, климат, аномалия температуры воздуха, технология, результаты испытаний.

Табл. 6. Ил. 2. Библ. 1.

**Мезомасштабная модель COSMO-Ru2 и результаты ее оперативных испытаний** / Ривин Г.С., Розинкина И.А., Багров А.Н., Блинов Д.В., Кирсанов А.А., Кузьмина Е.В., Шатунова М.В., Чумаков М.М., Алфёров Д.Ю., Бундель А.Ю., Зайченко М.Ю., Никитин М.А. // Информационный сборник № 44. – 2017. – С. 25–55.

Рассмотрены сведения о консорциуме COSMO, дано краткое описание модели COSMO, приводится описание технологии Гидрометцентра России мезомасштабного моделирования COSMO-Ru, рассмотрены особенности и примеры ее выходной продукции.

Приведены результаты оперативных испытаний прогнозов элементов приземной погоды и принятое на их основании решение ЦМКП от 15 декабря 2016 г. о внедрении в оперативную практику Гидрометцентра России: внедрить в оперативную практику по территории Московской области и ЦФО прогнозы осадков и скорости ветра по модели COSMO-Ru 2,2 км как дополняющие и детализирующие основной метод прогноза по модели COSMO-Ru 7 км и использовать прогнозы COSMO-Ru 2,2 км (температура, ветер, осадки) по территории Северного Кавказа в оперативной практике в качестве основного численного метода краткосрочного прогноза погоды.

*Ключевые слова:* оперативная система краткосрочного высокодетализированного прогноза погоды, моделирование мезомасштабных атмосферных процессов, количественные оценки прогнозов.

Табл. 19. Ил. 6. Библ. 15.

**Метод прогноза опасного природного явления – аномально жаркой погоды – на 48–144 часа для территории России и результаты его испытания** / Вильфанд Р.М., Васильева Е.Л., Мищенко С.Л., Лукьянов В.И., Голубев А.Д., Васильев П.П. // Информационный сборник № 44. – 2017. – С. 56–67.

Приводится краткое описание разработанного в ФГБУ «Гидрометцентр России» и реализованного на ЭВМ метода прогноза опасного природного явления (ОЯ) – аномально жаркой погоды в летние периоды. Прогностическая технология основана на системе расчета элементов погоды (РЭП) и предусматривает визуализацию для удобства работы с прогностическими материалами синоптиком-прогнозистом в виде таблиц и карт изолиний, а также коррекцию выходной продукции в Отделе краткосрочных прогнозов погоды. Прогноз составляется по территориям, на которых предполагается возникновение ОЯ, и рассылается в адреса членов правительственного штаба и территориальные управления Росгидромета. Приведены результаты оперативных испытаний метода в течение двух летних сезонов – 2015 и 2016 гг. Метод прогноза ОЯ и оценки успешности (результаты испытаний) докладывались на ЦМКП 15 декабря 2016 г., которая приняла решение внедрить метод в качестве основного в оперативную практику ФГБУ «Гидрометцентр России».

*Ключевые слова:* метод, прогноз, аномально жаркая погода, результаты испытаний.

Табл. 4. Ил. 1. Библ. 2.

**Методика определения высоты слоя свежевыпавшего снега по данным автоматических осадкомеров OTT Pluvio<sup>2</sup> 200 и метеостанций на территории Санкт-Петербурга и ближайших пригородов / Псаломщикова Л.М., Акентьева Е.М. // Информационный сборник № 44. – 2017. – С. 68–78.**

Разработанная методика основывается на зависимости отношения водного эквивалента твердых осадков к высоте слоя свежевыпавшего снега ( $H_{\text{см}}/R_{\text{мм}}$ ) от средней за снегопад приземной температуры воздуха. Осредненное по каждому одноградусному интервалу температуры значение  $H_{\text{см}}/R_{\text{мм}}$  принято в качестве коэффициента перехода от количества твердых осадков к высоте слоя свежевыпавшего снега для этой температуры. Представлена численная и графическая зависимость полученных коэффициентов от средней за снегопад приземной температуры воздуха.

Показано преимущество расчета высоты слоя свежевыпавшего снега по разработанной методике по сравнению с другими способами расчета. Полученные коэффициенты дают возможность получать не только фактические, но и прогностические значения высоты слоя свежевыпавшего снега.

*Ключевые слова:* методика, водный эквивалент твердых осадков, высота слоя снега, средняя за снегопад приземная температура, результаты испытания.

Табл. 2. Ил. 3. Библ. 8.

**Результаты испытания методов прогноза урожайности однолетних и многолетних трав по Новосибирской, Кемеровской областям и Алтайскому краю / Старостина Т.В., Ковригина И.Г. // Информационный сборник № 44. — 2017. — С. 79—88.**

Приведены результаты испытания методов прогноза урожайности однолетних и многолетних трав, разработанных в рамках выполнения региональной темы 1.7.45 Плана НИОКР Росгидромета. Технический совет ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» на заседании от 27 апреля 2016 г. и ЦМКП от 27 мая 2016 г. рекомендовали к внедрению в оперативную практику ФГБУ «Западно-Сибирское ЦГМС» с 2016 года методы прогноза урожайности однолетних и многолетних трав по территории Новосибирской, Кемеровской областям и Алтайскому краю в качестве основных.

*Ключевые слова:* метод, прогноз урожайности, однолетние и многолетние травы, результаты испытания.

Табл. 3. Библ. 4.

**Результаты испытаний метода среднесрочного численного прогноза ледовых условий для летнего и зимнего периодов в Баренцевом и Карском морях заблаговременностью 1–7 суток / Клячкин С.В., Гузенко Р.Б., Май Р.И. // Информационный сборник № 44. – 2017. – С. 89–112.**

В работе описываются испытания модифицированной численной прогностической модели распределения льдов в Баренцевом и Карском морях заблаговременностью 1–7 суток, основанной на численном методе «частиц в ячейке» (Particle-in-Cell, PiC). Главными направлениями совершенствования методики краткосрочного численного прогноза эволюции ледяного покрова являлись: 1) замена баротропного океанского блока на модель океана Принстонского университета (Princeton Ocean Model, POM) и 2) увеличение максимально возможного количества частиц (маркеров) в ячейке в два раза (теперь 40 маркеров в ячейке соответствуют 10 баллам сплоченности, 36 маркеров – 9 баллам и т. д.). Результаты испытаний показали, что в среднем оправдываемость прогнозов общей сплоченности в зимний период составила 93,0 % при эффективности +1,4 %, в летний – оправдываемость 93,9 %, эффективность 5,3 %. Оправдываемость прогнозов частной сплоченности составила в среднем 92,1 % при эффективности +1,7 %.

*Ключевые слова:* прогностическая модель, морской лед, оправдываемость, эффективность.

Табл. 2. Ил. 6. Библ. 17.

**Метод долгосрочного прогноза типа ледовых условий в зимний период для районов Карского моря** / Карклин В.П., Хотченков С.В., Юлин А.В. // Информационный сборник № 44. – 2017. – С. 113–125.

Представлена типизация ледовых условий зимнего периода для юго-западной и северо-восточной частей Карского моря, основной целью которой является установление критериев и выделение трех типов ледовых условий (легкий, средний, тяжелый), позволяющих оценить ледовую обстановку для обеспечения безопасного плавания судов.

На основе типизации и выделенных граничных критериев разработан метод долгосрочного прогноза на 30 суток типа зимних ледовых условий. Метод основан на использовании ряда устойчивых и хорошо проявляющихся признаков взаимосвязей и преемственности в развитии ледовых условий.

Испытания метода прогноза показали хорошую оправдываемость и эффективность прогнозов. Актуальность разработки метода определяется необходимостью информационного ледового обеспечения хозяйственных работ и плаваний в зимний период в Карском море.

*Ключевые слова:* Карское море, ледовый режим в зимний период, типизация ледовых условий, метод долгосрочного ледового прогноза.

Табл. 6. Ил. 1. Библ. 4.

**Система прогноза ветрового волнения в Черном море с детализацией в шельфовых зонах** / Мысленков С.А., Столярова Е.В., Архипкин В.С. // Информационный сборник № 44. – 2017. – С. 126–135.

Описывается технология прогноза ветрового волнения в Черном море с детализацией в шельфовых зонах. Прогноз ветрового волнения осуществляется с использованием спектральной волновой модели SWAN на нерегулярной вычислительной сетке и прогностических полей ветра GFS. Приводятся результаты сравнения прогнозов высоты волн с данными прямых измерений для глубокой воды и прибрежной зоны. Использование оригинальной нерегулярной сетки позволило получить модельные параметры ветрового волнения с шагом по пространству 200–300 м. Детальный прогноз ветрового волнения визуализирован для Керченского пролива, Цемесской бухты и района Сочи. При сравнении данных прогнозов по значительной высоте волн с измерениями были получены статистические показатели качества модели, которые являются вполне удовлетворительными для современных ветро-волновых моделей (коэффициент корреляции 0,8, среднеквадратическая ошибка 0,3 м). Модель хорошо воспроизводит как фазу наступления максимального ветрового волнения, так и абсолютные высоты.

*Ключевые слова:* прогноз волнения, Черное море, ветровые волны, шельф, оценка качества прогноза волнения, SWAN.

Ил. 8. Библ. 21.

**Краткосрочное прогнозирование уровней воды на реке Амур** / Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В., Юмина Н.М. // Информационный сборник № 44. — 2017. — С. 136—151.

Для реки Амур разработана система методик краткосрочного прогнозирования уровней воды, позволяющая математически описывать движение и трансформацию волн паводков и половодий в русловой сети на основе данных гидрометрических наблюдений. Проверка методик на независимом материале показала их достаточно высокую точность и эффективность. Методики применяются в автоматизированном режиме и используются для оперативного предупреждения об опасных наводнениях.

*Ключевые слова:* прогноз уровней воды, бассейн реки Амур, паводочный сток, параметры прогностической зависимости, погрешность и эффективность прогноза.

Табл. 6. Ил. 5. Библ. 6.

**Методика долгосрочного прогноза максимальных уровней воды для р. Оби у г. Нижневартовска и результаты ее испытания** / Бураков Д.А., Космакова В.Ф., Волковская Н.П. // Информационный сборник № 44. — 2017. — С. 152—157.

Кратко излагается новая методика долгосрочного прогноза максимальных уровней воды для р. Оби у г. Нижневартовска. Методика разработана в рамках выполнения темы 1.7.49 плана НИР и ОКР Росгидромета в 2011—2013 гг. в ФГБУ «СибНИГМИ». Она учитывает начальные тенденции развития весенних процессов, характеризующие последующий ход вскрытия реки. Разработаны две формулы, предикторами в которых являются показатели снегонакопления, уровни воды на 10 марта и 10 апреля в пунктах наблюдений, температура воздуха в апреле, а также характеристики ледостава выше расчетного пункта. Приведены результаты авторских и оперативных испытаний новой методики. Оперативные испытания проводились в ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС» и показали хороший результат — оправдываемость прогнозов 95 %; оценка качества методики прогнозов по формулам составила 0,556–0,561.

ЦМКП решением от 29.11.2016 г. утвердила методику к внедрению в оперативную практику ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС» в качестве основного метода.

*Ключевые слова:* максимальный уровень воды, Обь, прогноз, затор, гидрометеорологические факторы (предикторы), испытание методики.

Табл. 2. Библ. 8.

**Результаты испытания методики дешифрирования облачного покрова по спутниковым данным / Косторная А.А., Захватов М.Г., Токарева Ю.В. // Информационный сборник № 44. — 2017. — С. 158—170.**

Представлены результаты испытания методики дешифрирования облачного покрова. Основное назначение методики — идентификация и классификация облачности на космических изображениях с последующим восстановлением количественных характеристик. Методика обеспечивает получение цифровых массивов данных в виде карт классифицированной облачности, высоты (км) и температуры (°C) верхней границы облачности (ВГО).

*Ключевые слова:* методика, дешифрирование облачного покрова, спутниковые данные, классификация облачности, высота верхней границы, температура верхней границы, результаты испытания.

Табл. 4. Библ. 11.

Научно-производственное издание

## **ИНФОРМАЦИОННЫЙ СБОРНИК № 44**

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

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

---

Издатель: «Исследовательская группа “Социальные науки”»

СР 1044004204683 от 07.05.2004 г.

249039, г. Обнинск, ул. Королева, д. 6,

тел. 8 (906) 640-95-05, e-mail: ig\_socin@mail.ru

Корректор Н.А. Иванова

Компьютерная верстка: Е.С. Олейникова

Технический и выпускающий редактор В.Г. Колесников

Подписано в печать 07.04.2017. Формат 60×84/16.

Печать офсетная. Печ. л. 11,5. Тираж 300 экз. Заказ № 65.

Отпечатано: ООО «Информполиграф»

111123, Москва, ул. Плеханова, 3а.