

ISSN 0320-359X

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

ТРУДЫ
СИБИРСКОГО РЕГИОНАЛЬНОГО
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬНОГО
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Выпуск 106

ПРОБЛЕМЫ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ,
ЭКОЛОГИИ, КЛИМАТА СИБИРИ
(к 40-летию образования СибНИГМИ)

2011

Проблемы гидрометеорологических прогнозов, экологии, климата Сибири

Научное издание

ТРУДЫ СИБИРСКОГО РЕГИОНАЛЬНОГО
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА

Выпуск 106

**ПРОБЛЕМЫ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ,
ЭКОЛОГИИ, КЛИМАТА СИБИРИ**

(к 40-летию образования СибНИГМИ)

Технический редактор *Н. В. Бутакова*
Корректор *И. А. Абрамова*

Подписано в печать с оригинал-макета 21.07.2011
Уч.-изд. л. 13,5. Усл. печ. л. 15,5. Формат 60×90/16
Тираж 200 экз. Заказ № 223

Издательство СО РАН
630090, Новосибирск, Морской просп., 2
E-mail: psb@ad-sbras.nsc.ru
тел. (383) 330-80-50
Отпечатано в Издательстве СО РАН
Интернет-магазин Издательства СО РАН
<http://www.sibran.ru>

Проблемы гидрометеорологических прогнозов, экологии, климата Сибири

**МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

**ТРУДЫ
СИБИРСКОГО РЕГИОНАЛЬНОГО
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА**

Выпуск 106

**ПРОБЛЕМЫ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОГНОЗОВ, ЭКОЛОГИИ, КЛИМАТА СИБИРИ**
(к 40-летию образования СибНИГМИ)

Под редакцией
доктора физико-математических наук *В.Н. Крупчатникова*,
кандидата географических наук *О.В. Климова*



НОВОСИБИРСК
ИЗДАТЕЛЬСТВО СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
2011

УДК 551.5
ББК 26.23
Т78

Труды Сибирского регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института / под ред. В.Н. Крупчатникова, О.В. Климова; Мин-во природ. ресурсов и экологии РФ, Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. — ISSN 0320-359X. Вып. 106: Проблемы гидрометеорологических прогнозов, экологии, климата Сибири (к 40-летию образования СибНИГМИ). — 2011. — 248 с.

В сборнике представлены результаты исследований, проведенных в последние годы, описаны разработки региональных методов кратко- и долгосрочных прогнозов погоды, гидрологии, агрометеорологии и контроля окружающей среды. Ряд материалов носит обзорный характер, поскольку сборник приурочен к 40-летию юбилею института.

Сборник рассчитан на специалистов в области службы погоды, гидрометеорологии и экологии.

ISBN 978-5-7692-1180-5

© СибНИГМИ, 2011
© Оформление.
Издательство СО РАН, 2011

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А.</i> Современные оперативные системы численного прогноза погоды для ограниченной территории.....	5
<i>Завалишин Н.Н., Виноградова Г.М., Пальчикова Н.В., Романов Л.Н., Бочкарева Е.Г., Орлова З.С.</i> «Кассандра-Сибирь» — технология подготовки долгосрочных гидрометеорологических прогнозов по Сибири.....	13
<i>Здерева М.Я.</i> Развитие исследований в области интерпретации гидродинамических моделей атмосферы для прогноза характеристик погоды до пяти суток	26
<i>Шлычков В.А., Селегей Т.С., Мальбахов В.М., Леженин А.А.</i> Диагноз экстремальных концентраций формальдегида в г. Томске на основе численного моделирования	33
<i>Романов Л.Н.</i> Статистическое моделирование погоды с использованием глобальной информации	44
<i>Казьмин С.П., Волков И.А.</i> Динамика глобальных климатических событий за последние 150 тысяч лет	54
<i>Лучицкая И.О., Белая Н.И.</i> Режим сильных ветров и риски ущерба от их воздействия на территории юго-востока Западной Сибири.....	64
<i>Романов Л.Н., Бочкарева Е.Г., Богданова В.Ф.</i> Гидрологический долгосрочный прогноз в условиях Новосибирского водохранилища	89
<i>Казьмин С.П., Климов О.В.</i> Комплексная оценка экологической ситуации в условиях нефтедобычи на юге Западной Сибири	103

Набока В.В.

О развитии в ГУ «СибНИГМИ» прикладного динамико-статистического моделирования для агрометеорологического обеспечения земледелия Урало-Сибирского региона 112

Рапута В.Ф., Коковкин В.В., Девятова А.Ю., Чирков В.А., Казьмин О.Е.

Закономерности длительного загрязнения атмосферы и снегового покрова г. Новосибирска 130

Здерева М.Я., Токарев В.М., Виноградова М.В.

Автоматизированный прогноз температуры воздуха с обучением по методу группового учета аргументов 143

Здерева М.Я., Токарев В.М.

Анализ и прогноз условий погоды, влияющих на концентрацию атмосферных примесей мегаполиса 152

Келяшова Р.Е., Токарев В.М.

Анализ временных рядов атмосферных примесей в городе Новосибирске 159

Белая Н.И., Лучицкая И.О.

Оценка метеорологических условий для задач содержания федеральных дорог Новосибирской области 168

Ярославцева Т.В., Рапута В.Ф.

Численная модель восстановления полей выпадений вулканического пепла по данным наблюдений 181

Давидович Т.В., Каминская Л.Е., Морозова Э.А.

Особенности распределения, циркуляции и прогнозирования опасных явлений погоды в центральном районе Западной Сибири в разные периоды года 188

Завалишин Н.Н.

О зависимости максимумов чисел Вольфа от кривизны и кручения траектории движения Солнца относительно центра инерции Солнечной системы 208

Барактин В.Н., Лучицкая И.О., Белая Н.И.

История развития метеорологических наблюдений и исследований климата Новосибирска 219

СОВРЕМЕННЫЕ ОПЕРАТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ЧИСЛЕННОГО ПРОГНОЗА ПОГОДЫ ДЛЯ ОГРАНИЧЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ

Р.М. Вильфанд, Г.С. Ривин, И.А. Розинкина

ГУ «Гидрометцентр России», г. Москва

Введение

Развитие численного прогнозирования в России началось с классической работы И.А. Кибеля [1]. В дальнейшем после своего перехода в 1943 г. в организацию, которая с течением времени превратилась в Гидрометцентр России, И.А. Кибель продолжил эту работу, создав высококлассный коллектив ученых, состоявший в основном из его учеников. В статьях [2, 3], а также в ряде других статей трудов Гидрометцентра России, изложена история развития решения этой проблемы в Гидрометцентре России.

Конференция посвящена 40-летию создания Сибирского научно-исследовательского гидрометеорологического института (СибНИГМИ), поэтому вначале дается краткая история развития численного краткосрочного прогноза погоды для ограниченной территории в Сибири, проводившегося под руководством академика Г.И. Марчука. Так как для проведения численных прогнозов необходимы данные на боковых границах области интегрирования, приводится краткая информация о современном состоянии глобальных прогностических моделей и планах их развития в 2011—2012 гг., а затем уже аналогичная информация для моделей прогноза погоды по ограниченной территории. Далее описано состояние на данный момент системы краткосрочного прогноза погоды COSMO-RU и краткие выводы.

История развития численного краткосрочного прогноза погоды для ограниченной территории в Сибири

Первая, основанная на исходных уравнениях гидродинамики в квазистатическом приближении, численная 10-уровневая адиабатическая модель атмосферы для Сибирского региона была разработана Г.И. Марчуком и реализована под его руководством в 1964 г. [4]. Так как модель

показала неплохие прогностические свойства, то Г.И. Марчук поставил задачу подготовить ее версию для оперативного применения в Гидрометслужбе. По этой причине Г.Р. Контаревым и Г.С. Ривиным под руководством Г.И. Марчука была подготовлена 5-уровневая адиабатическая оперативная модель атмосферы [5], в которой был использован более эффективный метод решения, основанный на применении метода расщепления и метода биортогонализации с помощью нормальных мод для решения уравнения эллиптического типа. Проведенное Г.Р. Контаревым [6] по инициативе Г.И. Марчука и А. Шумана (директора Национального метеорологического центра (НМЦ) США в то время) сравнение 11-уровневого варианта [7] адиабатической модели [5] с 6-уровневой неадиабатической оперативной моделью НМЦ США показало практически близкое качество прогнозов, но требовало в 20 раз меньше машинного времени [3].

В дальнейшем на основе адиабатической версии модели атмосферы [3] под руководством В.П. Дымникова и Г.Р. Контарева была подготовлена неадиабатическая оперативная система прогноза погоды ДИАБАТ [8], которая только в 1992 г. была заменена на систему РЕГИОН с 15-уровневой моделью [9], основанной на опыте ЕЦСПП [10]. Численные эксперименты с 15-уровневой адиабатической версией модели ДИАБАТ [11] показали, что эта модель имеет большой потенциал и по-прежнему может быть использована в качестве базовой для развития эффективной системы прогноза погоды. Отметим, что более подробную информацию и необходимые ссылки можно найти в [11].

Современные оперативные системы краткосрочного прогноза погоды (ОСКПП)

В табл. 1 приведены параметры оперативных систем глобального прогноза погоды и план по их совершенствованию в 2011—2012 гг. для ряда ведущих метеорологических служб [12]. Из нее видно, что количество уровней и шаги сетки глобальных моделей атмосферы, используемых в Гидрометцентре России, уступают остальным моделям. Но качество прогноза приближается, а по некоторым показателям и превосходит зарубежные прогнозы, как это видно на рис. 1.

В табл. 2 приведены значения характерных параметров модели (шаг сетки и количество узлов сетки) также по данным WGNE — рабочей группы ВМО по численным экспериментам. Из таблицы следует, что уже сейчас модели атмосферы, используемые в Гидрометцентре России для прогноза по ограниченной территории, по значениям своих параметров соответствуют мировому уровню.

Т а б л и ц а 1

**Параметры оперативных систем глобального прогноза погоды
и план по их совершенствованию [12]**

Страна	2010 г.		2011 г.		2012 г.	
Велико-британия	25 км	L70	25 км	L70	20 км	L70
Германия	30 км	L60	20 км	L60	20 км (5 км Европа)	L70
ЕЦСПП	T _L 1279	L91	T _L 1279	L140?	T _L 1279	L140?
Канада	0,45 ⁰ * 0,3 ⁰	L80	0,45 ⁰ * 0,3 ⁰	L80	0,35 ⁰ *0,23 ⁰	L90
Китай	T639	L60	T639	L60	GRAPES	L60
Россия	T169	L31	T339	L31	T339	L63
	0,72 ⁰ * 0,9 ⁰	L28	0,37 ⁰ * 0,45 ⁰	L50	0,37 ⁰ * 0,45 ⁰	L60
США	T574	L64	T878	L64	T878	L64
Франция	T798 (10 км Зап. Евр.)	L70	T798 (10 км Зап. Евр.)	L70	T798 (10 км Зап. Евр.)	L70
Япония	T959	L60	T959	L60	T959	L60

Т а б л и ц а 2

Параметры (шаг сетки и количество узлов сетки) оперативных систем прогноза погоды по ограниченной территории и план по их совершенствованию [12]

Страна	2010 г.	2011 г.	2012 г.
Велико-британия	12,0 км: 600 * 360 * 70 1,5 км: 768 * 960 * 70	12,0 км: 600 * 360 * 70 1,5 км: 768 * 960 * 70	12,0 км: 600 * 360 * 90 1,5 км: 768 * 960 * 70
Германия	7,0 км: 665 * 657 * 40 2,8 км: 421 * 461 * 50	7,0 км: 665 * 657 * 40 2,8 км: 421 * 461 * 50	5,0 км окно в глоб. м. 2,8 км: 421 * 461 * 50
Канада	15,0 км: 576 * 641 * 80 2,5 км: 201 * 201 * 58	15,0 км: 576 * 641 * 80 2,5 км: 201 * 201 * 58	10,0 км: 800 * 800 * 80 2,5 км: 201 * 201 * 58
Китай	15,0 км: 550 * 330 * 31	5,0 км: 1650 * 990 * 60	5,0 км: 1650 * 990 * 60
Россия:			
РЕГИОН	40 км: 670 * 430 * 30	40 км: 670 * 430 * 30	40 км: 1270 * 860 * 40
COSMO-RU	7,0 км: 700 * 620 * 40 2,2 км: 470 * 420 * 50	7,0 км: 700 * 620 * 40 2,2 км: 470 * 420 * 50	5,0 км: 900 * 800 * 60 2,2 км: 470 * 420 * 60
WRF-ARW	11 км: 1250 * 500 * 31 3 км: 1300 * 1080 * 31	11 км: 1250 * 500 * 31 3 км: 1300 * 1080 * 31	11 км: 1250 * 500 * 31 3 км: 1300 * 1080 * 31
США	12,0 км: 954 * 835 * 60 4,0 км: 778 * 1099 * 35 5,2 км: 874 * 614 * 35 4,0 км: 191 * 309 * 35 5,15 км: 214 * 174 * 35	12,0 км: 954 * 835 * 70 4,0 км: 1371 * 1100 * 70 6,0 км: 595 * 625 * 70 3,0 км: 373 * 561 * 70 3,0 км: 241 * 241 * 70	12,0 км: 954 * 835 * 80 4,0 км: 1371 * 1100 * 80 6,0 км: 595 * 625 * 80 3,0 км: 373 * 561 * 80 3,0 км: 241 * 241 * 70

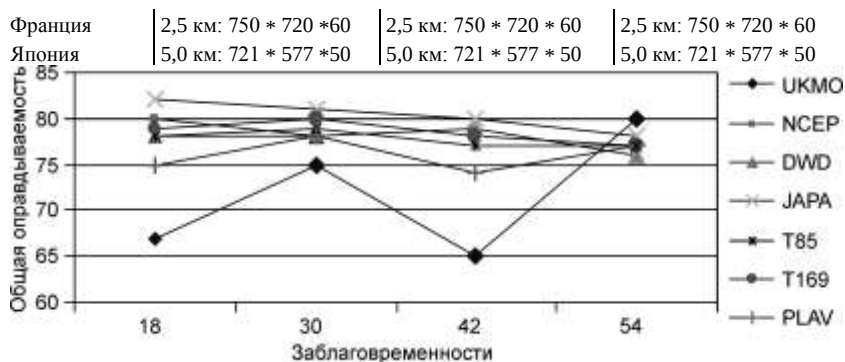


Рис. 1. Оправдываемость прогноза осадков для периода май — сентябрь 2010 г. для различных глобальных моделей атмосферы для территории России

Состав и возможности ОСКПП COSMO-RU ГУ «Гидрометцентр России», включающей негидростатическую модель атмосферы

В сентябре 2009 г. Росгидромет стал полноправным членом международного консорциума COSMO, созданного для использования в оперативных целях и развития негидростатической модели атмосферы COSMO (в каждой стране добавляется к имени модели две буквы из имени страны, поэтому в России версия модели консорциума имеет идентификатор COSMO-RU).

Если не входить в детали, то важными характеристиками модели атмосферы COSMO можно выделить следующие.

1. Модель является негидростатической, и, следовательно, для шагов сетки, не превышающих 3 км, можно обойтись без параметризации конвективных процессов и, прежде всего, глубокой.

2. В модели используется сдвинутая сферическая система координат, в которой в качестве полюса выбирается такая точка, что экватор в ней проходит через центральную часть области интегрирования. Благодаря этому расстояния между ближайшими узлами примерно постоянны для всей области интегрирования.

3. В качестве метода решения используется вариант метода расщепления по быстрым и медленным модам.

4. Модель COSMO является совместной моделью атмосферы и деятельного слоя почвы.

На рис. 2 приведены характеристики четырех областей интегрирования, для которых дается прогноз погоды и соответствующие параметры сетки. Подробное описание первых версий модели и ее свойств при-

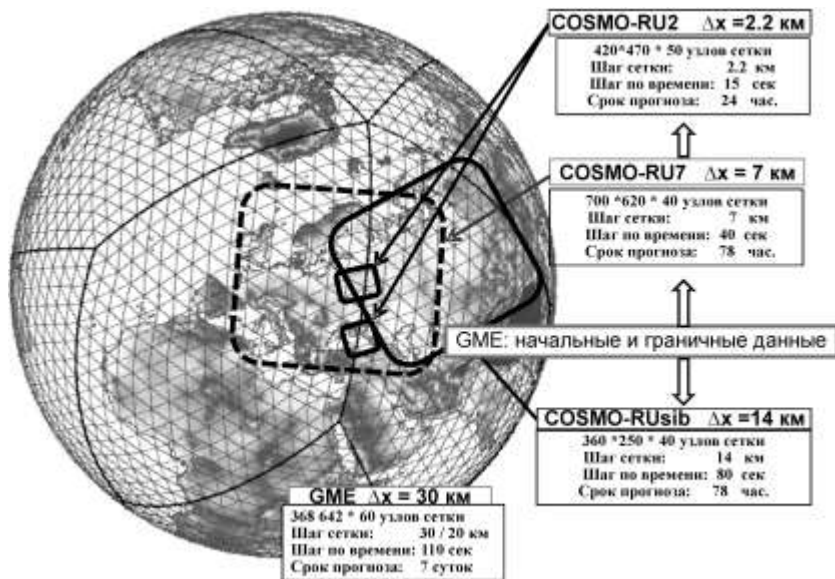


Рис. 2. Система прогноза погоды COSMO-RU: приведены четыре области интегрирования, для которых проводится прогноз погоды в оперативном режиме

ведено в [13, 14]. Для территории европейской части России и Урала шаг сетки равен 7 км, для территории Урала и Сибири — 14 км, для территорий Центрального федерального округа и района Зимней олимпиады Сочи 2014 — 2,2 км.

На рис. 3 приведены технологическая линия прогноза погоды COSMO-RU для первой территории и время выполнения для каждого блока. Из рисунка видно, что прогноз на 78 часов заканчивается через 3 часа 50 мин после срока наблюдения. После этого в автоматическом режиме подготавливается около 300 карт и 200 метеограмм и рассылаются пользователям по каналам FTP и интернета.

ОСКПП COSMO-RUsub для прогноза по территории Сибири

В 2010 г. в Гидрометцентре по согласованию с СибНИГМИ и Западно-Сибирским региональным вычислительным центром (РВЦ) была подготовлена система прогноза погоды COSMO-RUsub по территории Сибири и проведено испытание ее применимости на вычислительной

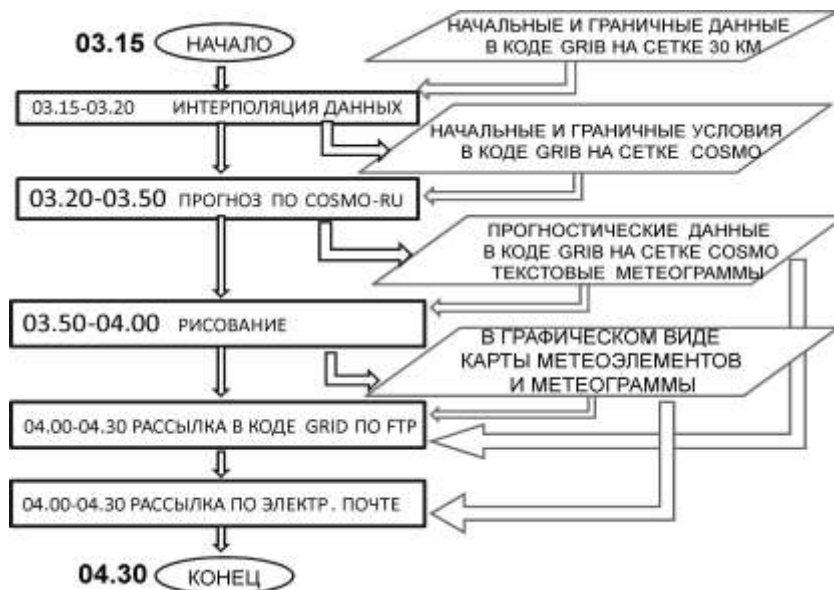


Рис. 3. Технологическая линия для сроков 00 и 12 часов системы прогноза погоды COSMO-RU для шага сетки 7 км с применением 800 ядер для распараллеливания вычислений по модели атмосферы. Время указано как отклонение от срока наблюдения

системе Altix 4700, установленной в РВЦ. С точки зрения пользователя, эта система отличается от установленной в ГВЦ Росгидромета только количеством процессоров, поэтому все работы, проводимые в Гидрометцентре России по разработке системы COSMO-RUsib, практически без сложных изменений переносятся на вычислительный комплекс РВЦ.

На первом этапе было решено расчеты проводить в ГВЦ для сетки с шагом 14 км, чтобы прогноз на 78 часов не превышал 40 мин, что позволяет оперативным синоптическим подразделениям получать прогнозы вовремя.

В настоящее время подготовлено и испытана система передачи начальных и граничных данных в РВЦ и начинается переход ко второму этапу, когда прогноз и его распространение будут проводиться в Новосибирске.

Часть карт и метеограмм, построенных по оперативным прогнозам, полученных с помощью системы COSMO-RUsib, ежедневно 2 раза в сутки (сроки 00 и 12 СГВ) размещается на сайте <http://sibnigmi.ru/> (сайт СибНИГМИ).

Планы на будущее

13 апреля 2011 г. ЦМКП приняла решение о внедрении системы мезомасштабного прогноза погоды COSMO-RU в оперативную практику в качестве базовой для использования в ГУ «Гидрометцентр России» и других прогностических учреждениях Росгидромета.

На основе выполненных работ, а также других исследований, проводящихся в ГУ «Гидрометцентр России», в настоящее время проводится работа по развитию и доведению до оперативной реализации ориентированная на численный прогноз опасных явлений погоды схема гидродинамического прогноза погоды в рамках системы гидрометеорологического обеспечения Зимней олимпиады Сочи-2014 г.

В научно-исследовательскую и оперативную деятельность, связанную с COSMO-RU, вовлечена талантливая молодежь МГУ им. М.В. Ломоносова, создается кадровый потенциал для формирования научной идеологии в области мезомасштабного гидродинамического моделирования и будущей ее реализации.

Литература

1. *Кибель И.А.* Приложение к метеорологии уравнений механики бароклининой жидкости // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. 1940. № 5. С. 627—638.
2. *Васильев А.А., Фролов А.В.* Гидрометцентр России на пороге нового века // 70 лет Гидрометцентру России. СПб.: Гидрометеиздат, 1999. С. 3—16.
3. *Вильфанд Р.М., Васильев А.А., Шестакова Н.А.* Гидрометцентр России в XXI веке // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триала, 2010. С. 3—20.
4. *Марчук Г.И., Курбаткин Г.П., Каленкович Е.Е., Панчук В.И., Ривин Г.С., Романов Л.Н.* О решении системы уравнений краткосрочного прогноза погоды // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1964. № 12. С. 1849—1858.
5. *Марчук Г.И., Контарев Г.Р., Ривин Г.С.* Краткосрочный прогноз погоды по полным уравнениям на ограниченной территории // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1967. № 11. С. 1166—1178.
6. *Контарев Г.Р.* Многоуровневая модель краткосрочного прогноза погоды по полным уравнениям // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1973. № 3.
7. *Контарев Г.Р.* Эксперимент по сравнению численных схем прогноза погоды Национального метеорологического центра США и Вычислительного центра СО АН СССР // Метеорология и гидрология. 1974. № 12. С. 102—108.
8. *Дымников В.П., Контарев Г.Р., Гусева Н.В., Колотовкин И.В., Кулиныч А.Г., Газетова Н.П., Шеметова Г.В., Каминская Л.Е., Торбина З.В.* Прогноз метеорологических элементов на ограниченной территории // Метеорология и гидрология. 1975. № 9. С. 6—13.

9. *Крупчатников В.Н., Маев В.К., Фоменко А.А.* Модель атмосферы на ограниченной территории с высоким разрешением // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1992. № 1.
10. *Louis O.-F.* (ed) ECMWF forecast model documentation manual // Internal Report. 1979. Vol. 1, N 27.
11. *Ривин Г.С., Медведев С.Б.* Гидродинамическая модель атмосферы для сибирского региона с применением метода расщепления // Метеорология и гидрология. 1995. № 5. С. 13—22.
12. *Report of the 25th Session of the Working Group on Numerical Experimentation (WGNE), Offenbach, Germany, 2—6 November 2009. CAS/JSC WCRP, WGNE, N 25. WMO/TD-No. 1524.* 2010.
13. *Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А.* Мезомасштабный краткосрочный прогноз погоды в Гидрометцентре России на примере COSMO-RU // Метеорология и гидрология. 2010. № 1. С. 5—17.
14. *Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А.* Система COSMO-RU негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: первый этап реализации и развития // Метеорология и гидрология. 2010. № 8. С. 5—20.

УДК 551.509.33

«КАССАНДРА-СИБИРЬ» — ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ ДОЛГОСРОЧНЫХ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ ПО СИБИРИ

Н.Н. Завалишин, Г.М. Виноградова, Н.В. Пальчикова,
Л.Н. Романов, Е.Г. Бочкарева, З.С. Орлова

*ГУ «Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт», г. Новосибирск*

Введение

В настоящее время основным методом долгосрочного гидрометеорологического прогноза является метод аналогов. Оправдываемость прогнозов, рассчитанных по этому методу, не слишком высока из-за сложностей с подбором точного аналога. Об этом предупреждали и авторы метода, да и наша оценка [1] показывает, что у метода аналогов, в его классическом понимании, нет значимых резервов в улучшении оправдываемости: 60—65 % оправдавшихся прогнозов для 2-классового распределения.

Как выйти к экономически значимым прогнозам, т. е. к прогнозам с оправдываемостью более 70 %? Есть два пути.

Первый — разработка новых методов прогнозирования, основанных на более глубоком понимании физики погодообразующих процессов. После установления факта изменения индекса завихренности атмосферы при пересечении границ межпланетного магнитного поля стало понятно, что концепция долгосрочного прогнозирования на основе автоколебательной модели достигла предела своих возможностей. Необходимо учитывать солнечно-земные связи и, как минимум, расширить понимание года-аналога: учитывать не только земные синоптические процессы, но и космическую погоду на уровне орбиты Земли.

Второй путь — комплексация прогнозов, полученных разными методами [2]. В конце 1989 г. в Гидрометцентре Иркутского УГМС было установлено АРМ «Кассандра-900» [3], предназначенное для подготовки долгосрочных метеорологических прогнозов по Восточной Сибири. Предполагалось, что это АРМ не только поможет в работе специалистам по долгосрочным прогнозам, но станет основой для комплексации прогнозов, полученных разными методами. К сожалению, этот проект не удалось реализовать из-за негативных последствий перестроечного периода.

В 2000 г. в Гидрометцентре ЗапСибУГМС было установлено АРМ «Кассандра-2000», предназначенное для автоматизации работ по расчету долгосрочных метеорологических прогнозов по Западной Сибири. Здесь, в отличие от иркутского варианта, цель была чисто прагматической — обеспечить автоматизацию расчета долгосрочных прогнозов по Западной Сибири. Архивы данных были получены из Гидрометцентра ЗапСибУГМС, причем резервная емкость по времени этих архивов ограничивалась 2008 г. из-за формы хранения информации, принятой несколько десятилетий назад.

Таким образом, к 2005 г. в Сибири функционировали два АРМ, различные по назначению и программному обеспечению с архивом ограниченной временной емкости. Возникла острая необходимость создания новой единой технологии подготовки долгосрочных гидрометеорологических прогнозов в Сибири.

В 2005—2007 гг. такая технология, получившая название «Кассандра-Сибирь», была спроектирована и создана. В 2008—2009 гг. проведены оперативные испытания технологии в сравнении с прогнозами Гидрометцентра России. По решению ЦМКП от 26 апреля 2010 г. технология рекомендована к внедрению в Западно-Сибирском и Иркутском УГМС как вспомогательный метод прогноза.

Назначение технологии:

- выпуск гидрометеорологических прогнозов на декаду, месяц, квартал и год по территории Западной и Восточной Сибири и смежным территориям;
- улучшение качества прогнозов;
- выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Составные части:

- Интерфейс технологии.
- Архив данных.
- Программное обеспечение методов расчета долгосрочных гидрометеорологических прогнозов.
- Канал получения оперативных данных.
- Инструкция по работе с программными средствами технологии «Кассандра-Сибирь».

Интерфейс технологии

Для работы с технологией «Кассандра-Сибирь» разработан удобный интерфейс. После запуска головной программы дальнейшая работа выполняется в диалоговом режиме. С помощью «мыши» можно легко выбрать нужный режим работы и задать необходимые параметры. Пер-

воначально на экране появляется главное окно. В верхней части этого окна отображается в виде строки главное меню. Главное меню предназначено для выбора режима работы. Пользователь может выбрать:

[ДАННЫЕ] — работа с архивными данными.

[ПРОГНОЗ] — счет новых или просмотр старых прогнозов.

[ОЦЕНКА] — оценка прогнозов.

[СПРАВКА] — справочная информация о системе и работе с ней.

[ВЫХОД] — выход из системы.

После того как режим работы задан, появляется соответствующее ему окно, в котором можно выбрать конкретные параметры работы.

Каталоги

Корневой каталог технологии KacZ содержит 5 подкаталогов: GEO_, PRGM, OCENKA, PROG, WORK.

Все данные, относящиеся к Земле и ее окружению, находятся в каталоге GEO_, содержащем подкаталоги по типам данных, элементам и разрешению.

Для научно-исследовательских целей применяется расширенный вариант архива данных, включающий данные по Солнцу и Солнечной системе — в каталоге KOSM.

Данные по Земле в свою очередь разделяются на 8 подкаталогов: ATMO, OKEN, GIDR, LITO, MAGN, PRIZ, IONO, LUNA, в которых содержатся данные по атмосфере (не приземной), океанам, гидрологии суши, литосфере, магнитосфере, приземной атмосфере, ионосфере и Луне соответственно (рис. 1).

Последним в цепочке подкаталогов всегда являются подкаталоги разрешения данных: _SUT — для суточных, _DEC — для декадных, _MES — для месячных и т. д. Для стандартизации принята 4-символьная кодировка имен каталогов.

Прогнозы записываются в каталог под именем PROG (в формате «Excel» и в текстовом виде), с последующим разделением на подкаталоги по регионам, годам, элементам и разрешению, методам прогноза.

Оценка прогнозов выполняется для температуры и осадков ежемесячно по разрешению по принятым в Росгидромете критериям. Результаты оценки собираются в каталог OCENKA с разделением по годам прогноза.

Программы для счета прогнозов и работы с архивом данных находятся в каталоге PRGM.

Рабочий каталог WORK содержит промежуточные результаты работы.

KacZ - КОРНЕВОЙ КАТАЛОГ

GEO_ - ЗЕМНЫЕ

KOSM - НЕЗЕМНЫЕ

MAGN - МАГНИТОСФЕРА

SUN_ - СОЛНЦЕ

IONO - ИОНОСФЕРА

PLNT - ПЛАНЕТЫ

ATMO - АТМОСФЕРА

KORP - ЧАСТИЦЫ

PRIZ - ПРИЗЕМНЫЕ

POLE - ПОЛЯ

OKEN - ГИДРОСФЕРА (океан)

GIDR - ГИДРОСФЕРА (суша)

LITO - ЛИТОСФЕРА

LUNA - ЛУНА

Рис. 1. Перечень основных каталогов базы

Информационные файлы (справочники)

В базе имеются три рода справочников:

- по элементам для каждого типа данных,
- по файлам для каждого элемента,
- по регионам.

Для каждого типа данных имеется свой *справочник по элементам*.

В этих справочниках хранится информация о коде имени элемента, под которым он представлен в базе, о самом элементе, единицах измерения, масштабном коэффициенте и пути к справочнику по файлам, содержащим данные по элементу. Сам справочник хранится в каталоге соответствующего типа данных (PRIZ, GIDR, ...).

В *справочнике по регионам* хранится информация о наборах гидрометеостанций (или постов), входящих в какую-либо региональную сеть. В настоящей версии задействовано четыре сети: две по Западной Сибири и две по Восточной Сибири. Справочник хранится вместе со справочником по элементам.

Справочники по файлам расположены в подкаталогах, где хранятся файлы с первичными данными. Каждому элементу сопоставляется свой справочник по файлам. В нем перечисляются все файлы с данными по элементу, причем для каждого файла дается информация о его имени, названии ГМС, ее синоптическом и координатном индексах, высоте

станции над уровнем моря, годе начала и конца архивных данных, количестве отсутствующих данных.

Файлы с данными

Каждый отдельный файл представляет собой ряд отсчетов одного элемента, взятых в одной точке пространства (по одной станции) за весь период наблюдений.

Имя файла (рис. 2) состоит из широты и долготы точки, в которой взяты данные (увеличенные в 10 раз и разделенные символом «п» для Северного полушария и символом «s» для Южного). Долгота может быть только восточной, т. е. находится в диапазоне 0—360 градусов. Для восстановленных данных символы «п» и «s» заменяются символами «#» и «\$» соответственно.

Расширение файла — закодированное название элемента (два символа) и код разрешения (один символ). Например, в файле 553n0784.T_s содержатся первичные данные по среднесуточной температуре приземного воздуха по ГМС «Барабинск» за весь период наблюдений, а в файле 553#0784.T_s — проверенные и восстановленные данные по этой же ГМС.

Записи файла. Данные хранятся в записях в виде целых 2-байтовых чисел.

В одной записи файла содержатся отсчеты по одному году. Количество чисел в записи определяется разрешением элемента. Так, для месячного разрешения потребуется 12 чисел плюс два служебных, для суточного разрешения — 366 плюс два дополнительных.

Дополнительные числа размещаются в конце записи, в первом из них хранится *год*, а во втором — *контрольная сумма* записи.

Код отсутствия данных: — 9999.

В записях файла хранится и служебная инфор-



Рис. 2. Кодировка имени файла базы, содержащего данные о среднемесечной температуре приземного воздуха по ГМС «Новосибирск» (55,1° с. ш., 83,0° в. д.)

Кодировка служебной информации в файлах базы

Коды («годы»)	Значения
15000—15999	Текстовая информация об источнике данных
16300	Десятичная степень масштабирующего множителя
16301	Норма
16302	Среднеквадратическое отклонение
16303	Максимум
16304	Минимум

мация. Для этого вместо года вставляется код, значение которого представлено в табл. 1.

Таким образом, каждый файл с первичными данными автономен. При необходимости из него можно извлечь всю информацию о его происхождении и о данных, хранящихся в нем. Каждый файл защищен от несанкционированного изменения.

Восстановление данных

Для заполнения пропусков в данных по температуре и осадкам на территории Западной и Восточной Сибири использовалась модель восстановления, основанная на применении метода минимизации среднего риска. Такой метод позволяет строить модели восстановления процессов, полей или отдельных областей поля и таким образом восстанавливать пропуски в точках, в которых значение соответствующего метеорологического элемента отсутствует. Модель аппроксимирует метеорологическое поле, в котором имеются пропуски, и далее эти пропуски восстанавливаются с помощью аппроксимирующей функции. В качестве последней брался полином подходящей степени, причем степень полинома не фиксировалась, а выбиралась автоматически, исходя из критерия среднего риска [4, 5].

Модель строилась для восстановления пропусков в данных по температуре и осадкам на 25 станциях Западной и 24 станциях Восточной Сибири. Для проверки качества восстановления были выбраны 20 лет, в которых отсутствовали пропуски данных. Далее искусственно создавались одиночные пропуски (последовательно на каждой станции), которые восстанавливались с помощью модели. Результаты восстановления сравнивались затем с результатами восстановления по климатическим нормам. В табл. 2 приведены общие результаты проверки качества восстановления.

Т а б л и ц а 2

Средние квадратичные ошибки восстановления одиночных пропусков (осреднение по станциям и месяцам или декадам)

Западная Сибирь					Восточная Сибирь				
	ТМ	ТД	ОМ	ОД		ТМ	ТД	ОМ	ОД
Модель	0,8	1,2	17,0	9,1	Модель	0,7	1,1	16,3	8,9
Климат	3,3	4,1	20,4	11,0	Климат	2,5	3,4	20,2	11,1

Примечание. ТМ — среднемесячная температура; ТД — декадная температура; ОМ — месячные осадки; ОД — декадные осадки.

Как видно из таблицы, качество восстановления одиночных пропусков с помощью модели превосходит качество восстановления пропусков по климатическим нормам для обоих регионов и всех четырех элементов. Для температуры преимущество модели более значительное, чем для осадков.

Однако при более подробном рассмотрении ошибок восстановления картина получается не такая ровная, и в некоторых случаях оценки результатов восстановления пропусков по модели хуже результатов восстановления по климатическим нормам. Это касается некоторых граничных станций, а также высокогорных станций, которые могут рассматриваться как граничные по вертикали.

Качество восстановления на этих станциях можно улучшить, если расширить круг станций таким образом, чтобы граничные станции перестали являться таковыми. Изначально граничными назывались такие станции, которые определяют выпуклый многоугольник, покрывающий все остальные станции. При этом в Западной Сибири из 25 станций граничными оказались девять, а в Восточной Сибири из 24 — семь.

Возможность восстановления информации в случаях, когда одновременно отсутствуют данные нескольких станций, была оценена при восстановлении пропусков в архиве за 1950—2006 гг. В Восточной Сибири число пропусков было значительным. В 1950—1960 гг. отсутствовала информация и по температуре, и по осадкам на 5—6 станциях одновременно. При восстановлении архивных данных сравнение качества восстановления по модели и по нормам проводилось следующим образом: из архива выбирались 20 лет, где информация была полной, делались искусственные пропуски на тех станциях, которые необходимо восстановить, проводилось восстановление и расчет оценки:

$$DD = d1/d2,$$

где

$$d1 = \sum_{i=1}^{n1} (F(i) - V(i))^2 / n1,$$

$$d2 = \sum_{i=1}^{n2} (F(i) - N(i))^2 / n2.$$

Здесь $F(i)$ — фактическое значение; $V(i)$ — восстановленное значение; $N(i)$ — климатическая норма; $n1$ — число случаев восстановления; $n2$ — число наблюдений в архиве.

Восстановленные по модели данные записывались в архив, если оценка $DD < 1$. В этом случае можно полагать, что качество восстановления будет не хуже восстановления нормами. Большинство пропусков удалось восстановить с помощью модели.

На основе вышеизложенного алгоритма сделано восстановление имеющихся в архиве данных и восстановление данных, пополняющих архив в оперативном режиме.

Пополнение данных

Для пополнения архива оперативными данными месячного и декадного разрешения необходим канал приема информации из сети Росгидромета. Через этот канал данные передаются в файлы `sinor_XX`, где `XX` обозначают две последние цифры года. Файлы хранятся в каталоге, путь к которому указывается при установке и запуске технологии.

Изменение данных

Чтобы начать работу по изменению архивных данных, надо в главном меню выбрать [ДАННЫЕ] → [изменение архивных данных]. Выбрав категорию архивных данных, в окне «ИЗМЕНЕНИЕ» следует задать параметры выбора нужных архивных данных: элемент, разрешение (декада, месяц), тип информации (оперативная, режимная, системная), сеть наблюдения. Набор предлагаемых для выбора элементов и сетей наблюдения зависит от избранной категории архивных данных. Если был выбран системный тип информации, то нужно будет еще выбрать, что именно необходимо для работы: нормы, среднеквадратическое отклонение, максимумы или минимумы. Задав все параметры, надо нажать на кнопку [ПОКАЗАТЬ]. В появившемся окне «ВНЕСИТЕ НЕОБХОДИМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ» вводятся новые значения. Чтобы сохранить изменения, надо нажать кнопку [ВНЕСТИ В АРХИВ]. Если это не будет сделано, то архивные данные останутся неизменными.

Методы прогнозов

Метод В.Д. Решетова. Прогноз среднемесячной температуры воздуха $T(L)$, вычисляется по формулам:

$$T_k(L) = N_k(T) + (\Delta T_k(L - 1) + \Delta T_{k+1}(L - 1))/2,$$

$$\Delta T_k(\dots) = T_k(\dots) - N_k(T),$$

где L — календарный год; k — номер месяца в год; $N_k(T)$ — «норма» температуры воздуха k -го месяца.

Метод В.Д. Решетова является основным расчетным методом сезонной заблаговременности. Этот метод нацелен на оценку высокочастотных, «быстрых» колебаний. И, что важно, имеет понятное физическое объяснение: есть доказательства влияния изменений конфигураций планет на солнечную активность и через нее на приземные поля метеоэлементов. Юпитер, самая тяжелая планета, перемещается за один год примерно на 30 градусов, т. е. если в этом году схождение Юпитера с Землей было в январе, то в следующем году оно будет в феврале. Метод В.Д. Решетова, на наш взгляд, как раз и улавливает влияние самой массивной планеты Солнечной системы в ее высокочастотном аспекте, в отличие от локально-климатической модели, которая ориентирована на низкочастотную составляющую тяжелых планет.

Локально-климатическая и оптимизированная модели. Чтобы предвидеть развитие природного процесса во времени, необходимо иметь представление о статистической структуре процесса и физических причинах, его порождающих. Мы предположили, что геофизические процессы приближенно можно представить как процессы, составленные из отрезков стационарных или близких к ним процессов. В основе этого предположения лежат гипотеза академика И.П. Дружинина «о существовании солнечно-обусловленных переломов в ходе гидрометеорологических процессов» [6] и факт существования «климатических скачков» в рядах гидрометеозлементов [7].

Метод основан на предположении о том, что математическое ожидание прогнозируемого процесса $Y(t)$ может быть приближенно представлено в виде кусочно-линейной (или кусочно-параболической) функции. Модель, оценивающая МО процессов указанным способом, получила название «локально-климатической модели» [8].

В процессе своего развития метод прошел четыре этапа:

1. Прогноз одномерного процесса (по отдельной ГМС).

2. Прогноз многомерного процесса (прогноз одного гидрометеорологического элемента по региону путем перехода к естественным ортогональным функциям).

3. Автоматический подбор оптимальных параметров модели для каждого прогноза в отдельности (оптимизированная локально-климатическая модель).

4. Прогноз полей гидрометеорологических элементов (совместный прогноз температуры, осадков, стока и др.).

Путем многочисленных экспериментов установлено, что максимум оправдываемости месячных прогнозов при условии фиксации управляющих параметров модели достигается при следующих значениях: $h = 12$ — минимальное количество отсчетов между соседними переломами; $\mu = 0,35$ — отношение «сигнал—шум»; $t_0 = 1900$ — год начала ряда; $L_E = L$ — количество естественных ортогональных функций максимально.

Модель с зафиксированными параметрами называется «локально-климатической моделью», в отличие от модели, которая к каждому прогнозу подбирает индивидуальные (оптимальные) параметры и поэтому называется «оптимизированной локально-климатической моделью». Пока что оптимизированная модель работает лучше локально-климатической лишь на прогнозах среднемесячных температур воздуха по Западной Сибири. Но ее потенциал, конечно, выше.

Метод долгосрочного прогноза приземной среднемесячной температуры воздуха и месячных сумм осадков, созданный на основе локально-климатической модели, успешно прошел ряд оперативных испытаний и был рекомендован ЦМКП Росгидромета к применению на территории Западной и Восточной Сибири как вспомогательный метод.

Климатологический прогноз. Для прогноза по климатологическому методу должна быть определена «норма» прогнозируемого метеорологического элемента. Под нормой понимается среднее значение метеорологического элемента за 30-летний период для данной станции и данного месяца.

Предположения о прогнозируемом процессе $X(t)$: математическое ожидание процесса постоянно:

$$E\{X(t)\} = \text{const},$$

т. е. предполагается стационарность по математическому ожиданию (МО) прогнозируемого процесса. В качестве оценки МО берут «норму» элемента.

Прогноз по климатологическому методу:

$$X(t_0 + \tau) = N_x,$$

где X — прогнозируемое значение элемента на момент времени $t_0 + \tau$; N_x — норма элемента X ; t_0 — момент времени выдачи прогноза; τ — заблаговременность прогноза.

Положительные факторы метода: любой элемент, любая заблаговременность, простота вычисления.

Отрицательный фактор метода: предположение о стационарности по математическому ожиданию гидрометеорологических элементов, как правило, не выполняется.

Климатологический метод целесообразно применять, когда нет более эффективных методов прогноза либо для оценки качества новых методов прогноза.

Инерционный прогноз. Под прогнозом по инерционному методу понимают прогноз, основанный на метеорологической инерции. Это значит, что значение метеоэлемента для данной станции и данного месяца равно значению метеоэлемента на этой же станции в этом же месяце предыдущего года.

Прогноз элемента X находится по формуле

$$X_k(L) = X_k(L - 1),$$

где X_k — прогнозируемое значение метеоэлемента; L — календарный год; k — номер отсчета в году (месяца, декады, суток, ...).

Положительные факторы метода: любой элемент, простота вычисления.

Отрицательный фактор метода: слишком упрощенная модель, ориентированная на медленно меняющиеся (инерционные!) процессы.

Инерционный метод целесообразно применять для сравнения при оценке качества новых методов прогноза.

Заключение

Базовая версия 1-1 технологии «Кассандра-Сибирь» [9] обеспечивает стандартную работу с данными: ввод, просмотр, контроль, восстановление, пополнение, замена, модификация и удаление. Кодировка версии состоит из двух чисел: первое означает новые изменения в программном обеспечении (новые методы, новые возможности оболочки), второе число — изменения в данных (новый регион, новый тип данных и т. п.).

Технология позволяет вычислять прогнозы по пяти методам:

- метод В.Д. Решетова;
- локально-климатическая модель;
- оптимизированная локально-климатическая модель;
- климатологический метод;

- инерционный метод.

Прогнозы считаются по двум сетям Западной Сибири (15 и 25 ГМС) и двум сетям Восточной Сибири (15 и 24 ГМС).

Гидрометеозлементы: суммы атмосферных осадков, средняя приземная температура воздуха, расходы воды по створам рек, полезный приток в озера и водохранилища.

Прогнозы имеют декадное, месячное, квартальное и годовое разрешение.

Технология способна работать с пентадным, суточным, полусуточным и срочным разрешениями.

Технология «Кассандра-Сибирь» обладает большим потенциалом развития: она не имеет ограничений ни по территории, ни по времени, ни по элементам, ни по разрешению.

По регионам технология способна работать на европейскую территорию России, на Дальний Восток, Монголию, Казахстан. По Монголии локально-климатическая модель была внедрена еще на ранней стадии развития — в 1988 г. [10], по Северному Казахстану — в стадии внедрения.

По элементам планируется прогнозировать не только средние значения, но и экстремальные, а также характеристики разброса: размах, средние и среднеквадратические отклонения, квантили.

Разработка и включение в технологию новых методов прогноза таких интегральных параметров, как длина вегетационного периода, продолжительность холодного периода года, суровость предстоящей зимы и других. Увеличение заблаговременности до 3—5 лет.

По нашему убеждению, пока мы не до конца понимаем процессы формирования погоды и климата, имеет смысл не противопоставлять разные методы между собой, а стремиться к их объединению, чтобы сильные стороны каждого метода, который прошел оперативные испытания, проявили себя в комплексном прогнозе. Что, собственно говоря, и пытаются сделать Гидрометцентр РФ для территории России и технология «Кассандра-Сибирь» для территории Сибири.

И последнее. Имя «Кассандра», которое дано новой технологии, навеяно сходством деятельности долгосрочных прогнозистов с жизнью Кассандры, дочери троянского царя Приама, которая была прорицательницей, т. е., по-современному говоря, долгосрочным прогнозистом. Но ее считали ненормальной и неэффективно использовали в жизни ценную прогнозистическую информацию. Надеемся, что технология «Кассандра-Сибирь» поможет более эффективно применять в практической работе долгосрочные и климатические прогнозы по Сибири и смежным регионам.

Литература

1. *Завалишин Н.Н.* Оценка верхней границы оправдываемости долгосрочных прогнозов по методу аналогов // Труды ЗапСибНИГМИ. 1990. Вып. 93. С. 99—105.
2. *Завалишин Н.Н.* О системе комплексации долгосрочных метеорологических прогнозов // Труды ЗапСибНИГМИ. 1990. Вып. 93 С. 123—131.
3. *Завалишин Н.Н., Пальчикова Н.В.* Алгоритмы выбора годов-аналогов в АРМ «Кассандра-900» // Труды СибНИГМИ. 2000. Вып. 103. С. 18—23.
4. *Поляков Г.Г., Романов Л.Н.* Скользящий контроль и линейная регрессия // Метеорология и гидрология. 1988. № 9.
5. *Романов Л.Н.* Об аппроксимации нелинейных зависимостей с помощью непрерывных функций // Труды ЗапСибНИИ. 1988. Вып. 83. С. 56—70.
6. *Дружинин И.П., Сазонов Б.И., Ягодинский В.Н.* Космос — Земля — Прогнозы. М.: Мысль, 1974. 288 с.
7. *Jatamoto R. et. al.* Climatic jump. A hypothesis in climatic diagnosis // J. Met. Soc. Jpn. 1986. Vol. 63. P. 1157—1160.
8. *Завалишин Н.Н.* Оценка математического ожидания метеорологических рядов кусочно-линейными функциями // Труды ЗапСибНИГМИ. 1990. Вып. 93. С. 12—24.
9. *Инструкция по работе с программным обеспечением технологии «Кассандра-Сибирь».* М.: Росгидромет, 2010. 54 с.
10. *Завалишин Н.Н., Намхай А.* Локально-климатическая модель и ее применение к долгосрочному прогнозу в МНР // Труды НИИ гидрометеорологии Монголии. 1988. Вып. 13.

РАЗВИТИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ ПРОГНОЗА ХАРАКТЕРИСТИК ПОГОДЫ ДО ПЯТИ СУТОК

М.Я. Здерева

*ГУ «Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт», г. Новосибирск*

Подходы к прогнозу погоды на средние сроки прошли все этапы от субъективного анализа до полной автоматизации. Значительное улучшение прогнозов связано с развитием моделирования атмосферных процессов. К настоящему времени, во-первых, значительно возросла успешность гидродинамических прогнозов барических полей на разных уровнях атмосферы, во-вторых, существенно изменилась параметризация большинства физических процессов по сравнению с первыми опытами. Это позволило расширить список прогнозируемых метеоэлементов. Сейчас гидродинамические схемы с достаточно высоким качеством выдают количественное значение ожидаемой температуры воздуха у земли на первые-вторые сутки. Но их успешность неравномерна по пространству и синоптическим ситуациям. Устранить этот недостаток призваны различные варианты интерпретации гидродинамической продукции. На сроки свыше двух-трех суток данный подход остается практически единственной возможностью получения объективных расчетных прогностических методов.

В России методическая база по объективизации прогнозов на основе гидродинамической продукции формировалась в главном Гидрометцентре под началом А.Л. Каца и получила дальнейшее развитие под руководством Петра Петровича Васильева. К настоящему времени эта система прогнозирования представляет целый автоматизированный комплекс с постоянной оптимизацией отдельных блоков [1] и с высокой оправдываемостью прогнозов температуры воздуха по России и Европе [2]. Менее масштабные, но нацеленные на учет региональных особенностей и удовлетворение потребностей периферийных метеослужб разработки проводятся в ДВНИГМИ [3] и СибНИГМИ. Сибирское направление интерпретации гидродинамических прогнозов развивалось параллельно московскому с 70-х годов прошлого века под руководством Инессы Герасимовны Храмцовой. Первая разработанная ею схема посвящена прогнозу значительных похолоданий на юго-востоке Западной

Сибири на 2—3 суток [4]. Целенаправленные исследования по созданию расчетных схем среднесрочных прогнозов в ЗапСибНИГМИ начались в 1976 г. с организации лаборатории прогнозов погоды малой заблаговременности.

Начальный подход к интерпретации гидродинамических моделей имел синоптико-статистический характер, поскольку большая часть исследований отводилась изучению региональных особенностей процессов через типизацию синоптических процессов над территорией Сибири [5], организацию архива метеоданных, районирование территории. Уже первые прогностические схемы показали более высокое качество прогнозов по сравнению с аналогичными выпусками центрального Гидрометцентра и были внедрены в оперативную практику. Главным недостатком этих работ была немалая доля ручного труда на процедурах подготовки архивов, исходной информации для расчетов и распространения готовой продукции. Кроме того, содержался субъективный момент при определении ожидаемой формы циркуляции специалистом-синоптиком.

Приобретение опыта определило дальнейшие направления в исследованиях:

- автоматизация всех блоков подготовки, расчетов и рассылки прогнозов;
- детализация прогнозов по времени;
- детализация прогнозов по пространству;
- переход на прогнозы редких явлений;
- прогноз комплексных метеорологических явлений;
- прогноз условий возникновения стихийных бедствий по метеорологическим факторам.

Именно в этих направлениях проходило и продолжается до сего времени развитие исследований по созданию среднесрочных схем прогнозов в сибирском институте.

Автоматизация

Рассмотрим основные составные элементы технологической линии прогноза, основанной на продукции гидродинамических моделей атмосферы (ГДМА): *архивы метеорологических данных; методы и программное обеспечение расчета объективных прогнозов метеозадаваемых элементов; программное обеспечение для автоматизированной рассылки результатов; программы оценок прогнозов*. Современная работа с массивами данных существенно отличается от первоначальных ручных выписок с метеорологических карт или книжек наблюдений и последующей перфора-

ции. Каждый этап такой работы был не только энергоемким, но и добавлял ошибки. Действующие сегодня автоматизированные алгоритмы сбора и обработки информации предоставляют возможность достаточно легко накапливать большие архивы как фактически наблюдаемых величин, так и прогностической продукции ведущих метеорологических центров. Облегчают работу и различные СУБД: ГИС-МЕТЕО, «ПРОМЕТЕЙ», SQL-база СибНИГМИ. Большинство разработок СибНИГМИ основано на PP (Perfect Prognosis)-подходе, который в отличие от MOS (Model Output Statistic) обеспечивает статистическую однородность рядов и независимость от используемой ГДМА. С облегчением этапа создания выборок исследователь волен избирать любую концепцию при построении решений. В последних схемах СибНИГМИ архивные выборки признаков сформированы из объективных анализов глобальных моделей ECMF и UKMO, где фактические данные через алгоритмы объективизации представлены в идентичной прогнозам сетке. Наиболее тонким моментом в автоматизированной архивации фактических данных является контроль и исправление ошибочных данных, которые с большой вероятностью несут отрицательный вклад в качество прогнозов [3]. Алгоритмы контроля и восстановления данных постоянно совершенствуются, внедренные к настоящему времени используют комплексный анализ данных по времени и пространству и функции Грина для восстановления данных сплайном по пространству [6].

Методические блоки в интерпретационных схемах отличаются по концепции построения расчетных уравнений, по заданию временных интервалов исходных выборок, по способам построения рабочих выборок и способам отбора предикторов в прогностических зависимостях. Это касается не только схем разных методических центров [1, 3], но и схем в историческом ряду одного исследовательского коллектива. В СибНИГМИ методика получения расчетных уравнений эволюционирует от применения наиболее простых уравнений регрессии и дискриминантного анализа до алгоритмов самоорганизации модели по внешним критериям (МГУА) [7] и алгоритмов построения логических деревьев решений (DW) [8]. При формировании исходных выборок, как правило, учитывается сезонная изменчивость синоптических процессов и связанных с ней значений метеозлементов, рабочие же выборки строятся с учетом внутрисезонной изменчивости. При этом алгоритмы построения рабочих выборок делятся на адаптивные и постоянные. В первом случае широко используется принцип аналогичности полей, т. е. ранжирование ситуаций по расстоянию Махаланобиса относительно заданного поля [9]. В схемах СибНИГМИ апробированы варианты подбора аналогов как по элементам атмосферных полей [10, 11], так и по ко-

эффицентам разложения метеополей на естественные ортогональные функции [12, 13]. В последних исследованиях при формировании рабочих выборок применена типизация процессов либо по заданным критериям, либо по решениям DW-деревьев. Например, значения температуры воздуха, особенно в зимний период, существенно зависят от наличия или отсутствия инверсии, поэтому логично построить выборки по знаку разности температур у земли и на АТ-850 [6]. А решающие уравнения для осадков строятся по соответствующим классам, полученным по DW-деревьям [6]. Список потенциальных предикторов ограничивается модельными выпусками и опирается как на современные физические представления о влияющих на погоду факторах, так и на опыт прогнозирования тех или иных элементов погоды. В первых работах отбор информативных предикторов в основном производился при предварительном анализе физических связей. По мере развития вычислительных возможностей эта задача передается используемым статистическим алгоритмам, например, выбор решающих признаков по внешним критериям в алгоритме МГУА или выбор признаков и их значений по критериям в алгоритме DW. Однако с исследователя не снимается ответственность за физическую значимость исходного факторного списка.

В конце прошлого столетия доведение результатов прогнозов до потребителей было частично автоматизировано. По расписанию отправлялись телеграммы, заполняющиеся соответствующими модулями. Синоптик на месте получал распечатки прогнозов. Сегодня на этом этапе подключены возможности интер- и интранет-сервиса. Прогнозы и их оценки по мере поступления выкладываются в локальную сеть. Последней разработкой является экспортирование результатов в АИС «Погода в реальном времени» и отображение их в интернет-портале в разных графических режимах.

Таким образом, задача полной автоматизации выполнена, но совершенствование всех блоков расчетной линии и пользовательских интерфейсов продолжается.

Детализация продукции по времени и пространству

Данное направление в физико-статистических интерпретациях шагает в ногу с эволюцией модельных прогнозов. Если первая сибирская схема базировалась лишь на прогнозе имеющегося к тому времени геопотенциала на АТ-500 на 72 ч, то и выдавала она лишь прогноз аномалии температуры воздуха на пентаду и декаду [14]. Но уже в 1986 г. в оперативную практику внедрена разработанная схема прогноза экстремальной температуры воздуха по дням до пяти суток по 23 пунктам Си-

бирского региона [15]. Расширение списка пунктов прогноза затруднялось ручным архивированием метеорологических данных по станциям, тем не менее территория расчета была доведена до 43 пунктов. В настоящее время разрабатываемые схемы способны выдать прогноз по любым пунктам, имеющим наблюдения. Детализации прогнозов по пунктам Новосибирской, Томской, Кемеровской областей, Алтайского края и Ханты-Мансийского автономного округа посвящены работы после 2000 года.

Расширение списка прогнозируемых элементов

Накопление архивов и исследовательского опыта позволило разрабатывать методики и автоматизировать среднесрочные прогнозы таких элементов, как осадки, облачность, преобладающий ветер [12, 15, 16]. Уникальным моментом является использование спутниковых данных в методике прогноза осадков и облачности. Для этой цели Прокопьевой Ириной Петровной была разработана балльная шкала кодировки основных синоптических объектов, попадающих в пятиградусный квадрат сетки. Значения кода ранжированы по вероятности выпадения осадков. Сотрудниками институтской лаборатории создан архив декодированных спутниковых полей, используемый для обучения. Оперативная кодировка по спутниковому снимку производится специалистами Западно-Сибирского РЦПОД. Исходное поле заложено как предиктор при прогнозе на первые сутки; для перехода на следующую заблаговременность создан алгоритм адвективного переноса основной облачности по ведущему потоку на АТ-500, подготовлено программное обеспечение для его автоматизации [17].

Следующий этап работ посвящен попыткам прогнозирования редких явлений погоды, например, сильного ветра. Корректная работа с малыми выборками традиционными статистическими методами невозможна, поэтому в рамках этой исследовательской темы разработана комплексная числовая характеристика, отражающая вероятность условий для усиления ветра до опасных значений, которая применена для получения альтернативного решения по эмпирически определенным границам [18]. Сегодня подобная задача решается с помощью DW-алгоритма. Алгоритмы распознавания образов были использованы в методах прогноза комплексных метеорологических явлений, таких как заморозки, метели, показатель условий для загрязнения воздуха [19—23]. Эти разработки уникальны и являются единственными в России.

Текущие исследования посвящены прогнозированию метеорологического показателя пожароопасности в лесах [6, 24]. В данной методике предложена модификация индекса Нестерова с учетом экспоненциальной зависимости упругости насыщения водяного пара от температуры

воздуха. Разработан полностью автоматизированный расчет — заинтересованные в охране лесов административные органы имеют расписанные по дням пентады и по пунктам региона ожидаемые классы пожароопасности. В картографическом виде с удобным интерфейсом они представлены в упомянутой выше АИС «Погода в реальном времени».

Итогом деятельности лаборатории является более 20 разработанных методов среднесрочного прогноза элементов погоды, более 30 решений об их внедрении в работу синоптических подразделений Урала, Сибири, Республики Саха. Выпуски наших прогнозов до сих пор являются главным подспорьем в ежедневной практике Гидрометцентра Новосибирского ЦГМС РСМЦ.

Литература

1. *Васильев П.П., Васильева Е.Л.* Система статистической интерпретации выходной продукции гидродинамических моделей для среднесрочного прогноза погоды // 70 лет Гидрометцентру России. СПб.: Гидрометеиздат, 1999. С. 118—133.
2. *Васильев П.П., Васильева Е.Л., Веселова Г.К., Горлач И.А.* Метод прогноза преобладающей минимальной максимальной температуры воздуха, детализированного по территории семи федеральных округов России и Республики Беларусь // Информационный сборник. 2009. № 6. С. 43—57.
3. *Вербицкая Е.М.* Среднесрочный прогноз элементов и явлений погоды для станций Дальневосточного региона России // Труды ДВНИГМИ. 2003. Вып. 149. 160 с.
4. *Храмцова И.Г.* Усовершенствованная физико-статистическая схема прогноза значительных похолоданий на юго-востоке Западной Сибири на 48—72 ч // Труды ЗСРНИГМИ. 1976. Вып. 21. С. 3—11.
5. *Храмцова И.Г.* Сезонные особенности зональных и меридиональных процессов над территорией Западной и Восточной Сибири // Труды ЗСРНИГМИ. 1978. Вып. 36. С. 62—69.
6. *Разработать метод и технологию расчета среднесрочного прогноза температуры воздуха, осадков и индекса пожароопасности по районам Ханты-Мансийского автономного округа-Югра и административным районам Алтайского края, Томской и Кемеровской областей* (Науч. рук. М.Я. Здеревя). Отчет НИР, № ГР 01200964812. Новосибирск: СибНИГМИ, 2009. 88 с.
7. *Ивахненко А.Г., Юрачковский Ю.П.* Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. М.: Радио и связь, 1987. 120 с.
8. *Манохин А.Н.* Алгоритм DW для распознавания образов: Пакет прикладных программ ОТЭКС. Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1981. С. 3—30.
9. *Храмцова И.Г.* Учет аналогичности в прогностических схемах // Труды Зап-СибНИГМИ. 1988. Вып. 88. С. 3—8.
10. *Здеревя М.Я., Торубарова Г.П., Шустова Г.А.* Физико-статистическая схема прогноза экстремальной температуры воздуха по станциям Новосибирской

области на 1—5 суток // Труды СибНИГМИ. Вып. 105. http://sibnigmi.ru/documents/papers_v105.

11. *Здерева М.Я., Токарев В.Г., Торубарова Г.П.* О результатах испытания метода и технологии прогноза температуры воздуха по полусуткам пентады для административных районов Новосибирской области (Новосибирский ЦГМС-РСМЦ, СибНИГМИ) // Информационный сборник. 2006. № 33. С. 54—66.
12. *Храмцова И.Г., Прокопьева И.П., Здерева М.Я., Шустова Г.А.* Прогноз осадков на 1 — 5 дней по южной половине Урала и Сибири в холодное полугодие // Труды ЗапСибНИГМИ. 1989. Вып. 90. С. 3—12.
13. *Храмцова И.Г. и др.* Модель прогноза осадков на 1—5 дней в теплое полугодие по территории Урала и Сибири // Труды СибНИГМИ, 1992. Вып. 100. С. 167—178.
14. *Храмцова И.Г., Шульман С.М.* Схема прогноза средней температуры воздуха и ее аномалии на 5 дней // Труды ЗСРНИГМИ. 1979. Вып. 42. С. 56—63.
15. *Храмцова И.Г., Шустова Г.А.* Опыт использования в оперативных условиях модели прогноза экстремальной температуры на 1—6 суток // Труды ЗапСибНИГМИ. 1990. Вып. 93. С. 106—112.
16. *Храмцова И.Г., Шустова Г.А.* Прогноз скорости преобладающего ветра на 1—5 суток по территории Урала и Сибири // Труды СибНИГМИ. 2000. Вып. 102. С. 41—48.
17. *Прокопьева И.П., Токарев В.Г.* Способы прогноза балла облачности на территории Сибири // Труды СибНИГМИ. 1995. Вып. 101. С. 44 — 51.
18. *Торубарова Г.П., Чадова М.М., Здерева М.Я.* Результаты испытания автоматизированного метода прогноза сильного (25 м/с и более) ветра на 1—3 суток по территории Новосибирской области и Алтайского края в теплый период года // Информационный сборник. 2006. № 32. С. 33—39.
19. *Здерева М.Я., Носкова А.Д.* Результаты испытания автоматизированного метода прогноза метелей разной категории по полусуткам пятидневки для территории Уральского УГМС // Информационный сборник. 2006. № 32. С. 40—57.
20. *Токарев В.Г.* Метод прогноза заморозков по дням пентады для юга Красноярского края // Труды СибНИГМИ. 2000. Вып. 103. С. 115—120.
21. *Храмцова И.Г., Келяшова Р.Е.* Прогноз НМУ в г. Кемерово с заблаговременностью 1—5 суток // Труды СибНИГМИ. 1995. Вып. 101. С. 68—78.
22. *Храмцова И.Г., Шустова Г.А.* Автоматизированный метод прогноза заморозков на 1—5 суток для юго-востока Западной Сибири // Труды СибНИГМИ. 2000. Вып. 102. С. 34—40.
23. *Храмцова И.Г., Шустова Г.А.* Прогноз заморозков на 1—5 суток на территории Уральского УГМС // Труды СибНИГМИ. 2000. Вып. 103. С. 24—41.
24. *Здерева М.Я., Виноградова М.В.* Среднесрочный прогноз степени пожарной опасности в лесах по метеорологическим условиям // Метеорология и гидрология. 2009. № 1. С. 16.

ДИАГНОЗ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ФОРМАЛЬДЕГИДА В Г. ТОМСКЕ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В.А. Шлычков, Т.С. Селегей, В.М. Мальбахов, А.А. Леженин

*ГУ «Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт», г. Новосибирск*

Введение

Проблема загрязнения атмосферы формальдегидом остро стоит во всех крупных городах РФ, причем в Сибири формальдегидная нагрузка в 2 раза выше, чем в целом по стране, а среднегодовые концентрации составляют 5 ПДК и более [1]. Формальдегид является токсичным веществом 2-го класса опасности, обладает канцерогенным действием и негативно влияет на центральную нервную систему человека.

Основными источниками поступления формальдегида в атмосферу являются предприятия нефтехимии, деревообработки, производства пластмасс, котельные, автотранспорт. Вторичными источниками служат различные углеводородные соединения (метан, этилен, и др.), которые в результате фотохимических реакций преобразуются в формальдегид.

В г. Томске имеется 6 стационарных постов наблюдений (рис. 1, а), на которых проводится контроль за содержанием формальдегида. Для анализа закономерностей формирования концентраций обработаны ряды наблюдений по постам за период 2003—2007 гг. Полученная информация разбита на три группы: 1) благополучное экологическое состояние городского воздуха; 2) повышенная концентрация формальдегида, когда на отдельных постах регистрировалось превышение среднесуточных значений ПДК (ПДК_{сс}); 3) экстремальные ситуации, когда не менее чем на трех постах фиксировалось превышение мгновенных разовых ПДК (ПДК_{мр}, превышающая ПДК_{сс} более чем в 10 раз). Диагноз экстремальных ситуаций третьей группы представляет наибольший практический интерес и в данной работе являлся предметом исследований. Таблица показывает, что экстремальные концентрации в Томске формируются сравнительно редко — за 5-летний период обнаружено 168 дней, так что повторяемость p (вероятность события) составила около

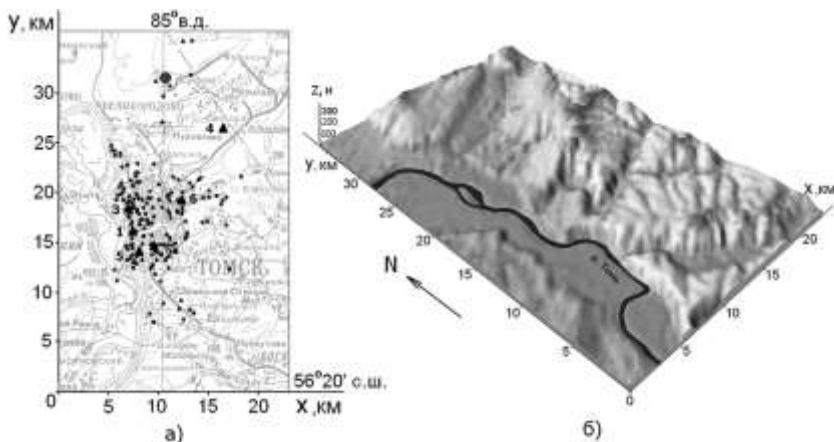


Рис. 1. а — система координат, положение источников эмиссии (отдельные точки) и постов наблюдений 1—6 (треугольники) в городе; б — рельеф территории

0,09. Наибольшее число случаев пришлось на летние месяцы. Градация дней с высоким загрязнением по направлениям высотного ветра показала, что максимум случаев соответствует ветрам юго-западного сектора. Во всех случаях сила ветра у земли не превышала 2 м/с.

Анализ данных наблюдений в отдельных точках города не дает полной информации о характере распределения формальдегида по территории. Обычно применяемая для целей нормирования выбросов модель ОНД-86 [2] заметно искажает значения концентрации по отношению к фактически наблюдаемым, а вопрос ее применимости к орографически неоднородной местности (в частности, для г. Томска) остается открытым.

Цель данной работы заключается в реконструкции полей концентрации формальдегида в г. Томске на основе численной модели с использованием данных наблюдений при различных метеорологических

Число дней в году с экстремально высокими концентрациями формальдегида

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Итого
2003	2	1			1	4	5	3	5			1	22
2004					4	4	9	8	7	1		1	34
2005					1	12	8	4	1			1	27
2006				8	3	2	2		5		2		22
2007					2	5	15	17	14	5	2	3	63
Итого	2	1		8	11	27	39	32	32	6	4	6	168

ситуациях. Это требует решения следующих задач:

— создание базы данных по источникам валовых выбросов в городе с учетом химических превращений углеводородных и органических соединений в формальдегид;

— идентификация параметров численной модели переноса примеси для обеспечения адекватности расчетных и фактически наблюдаемых концентраций;

— детализация ветрового режима над городом с учетом орографической неоднородности территории;

— построение среднегодовых полей экстремальных концентраций путем осреднения по румбам розы ветров.

Модель переноса формальдегида

В горизонтальной плоскости введем декартову прямоугольную систему координат (x, y, z) , в которой ось x направлена на восток, ось y — на север, а ось z — вертикально вверх. Определим область решения как

$$0 \leq x \leq L_x, \quad 0 \leq y \leq L_y, \quad \delta \leq z \leq h,$$

где $L_x = 23$ км, $L_y = 36$ км — размеры области, включающей г. Томск с окрестностями (см. рис. 1, а), функция $\delta(x, y)$ описывает рельеф местности (см. рис. 1, б); h — верхняя граница расчетной области.

Для расчета распределения формальдегида по территории использовалось уравнение переноса и диффузии вида

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial c}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial c}{\partial z} + J, \quad (1)$$

где c — искомая концентрация; u, v — компоненты горизонтальной скорости ветра; K_x, K_y, K_z — коэффициенты турбулентной диффузии; J — интенсивность источников эмиссии.

Краевые условия на боковых границах задавались в виде

$$\frac{\partial c}{\partial n} = 0 \text{ при } u_n > 0, \quad c = 0 \text{ при } u_n \leq 0, \quad (2)$$

где n — направление внешней нормали; u_n — нормальная скорость на границе. По вертикали принято

$$\frac{\partial c}{\partial z} = 0 \text{ при } z = \delta, \quad K_z \frac{\partial c}{\partial z} = -\alpha_g c \text{ при } z = h, \quad (3)$$

где α_g — декремент затухания профиля концентрации на высотах, полученный из формул гауссова факела [3]. В качестве начальных условий принято $c = 0$.

Метод решения задачи (1)—(3) основан на дискретизации уравнения (1) в сеточной области. По горизонтали используется равномерная прямоугольная сетка с узлами, разнесенными по граням элементарного пространственного бокса [4]. Аппроксимация операторов адвекции выполнена на основе TVD-схемы (Total Variation Diminishing) с невозрастанием полной вариации, гарантирующей монотонность решения. При интегрировании по времени применяется неявная схема расщепления, при этом TVD-части алгоритмизировались в соответствии с методом [5]. Пространственное разрешение модели определяется шагами $\Delta x = \Delta y = 200$ м.

Инвентаризация источников эмиссии показала, что в городе имеется 65 предприятий с прямым выбросом формальдегида разной интенсивности, около 100 с эмиссией углеводородов, ряд магистральных дорог и перекрестков (учтены 40 участков дорог). Эта информация использовалась при формировании функции $J(x, y, z)$ в (1). В целом консолидированный объем валовых выбросов составляет 106 т/год. Источник с максимальной мощностью 48 т/год (нефтехимический комбинат) расположен к северу от города ($y \approx 31$ км, см. рис. 1, а).

В сформулированной модели имеется ряд свободных (неопределенных) параметров. Вариация параметров так или иначе влияет на перераспределение концентрации в пространстве. Например, при увеличении скорости адвекции факел от отдельно взятого источника становится узконаправленным, а концентрация в нем уменьшается. При увеличении коэффициентов диффузии доминируют эффекты рассеяния и ширина факела, напротив, возрастает, определенным образом будут меняться и расчетные значения c в точках наблюдения. Это обстоятельство дает возможность целенаправленно подобрать параметры модели так, чтобы максимально приблизить расчетные концентрации к наблюдаемым и, тем самым, провести калибровку по натурным данным. В качестве варьируемых величин использовалось два параметра: модуль скорости ветра из диапазона 0,1—1 м/с и коэффициенты диффузии K_x, K_y (в численных экспериментах полагалось $K_x = K_y$). Смысл параметров K_x, K_y в данном контексте отличается от традиционно принятого — они отражают не степень турбулизации воздушной среды, а меру неопределенности направлений ветра в диапазоне штилевых значений.

Предполагалось, что развитие экстремальных ситуаций может быть связано с направлением атмосферного переноса. Поэтому данные таб-

лицы были разбиты на 8 секторов круга ветров и расчеты выполнялись в соответствии с градацией данных по направлениям. При проведении оптимизации формировался функционал ошибок

$$\Phi = \sum_{n=1}^6 |c_n^{\text{fact}} - c_n^{\text{calc}}|, \quad \Phi \rightarrow \min, \quad (4)$$

где c_n^{fact} — фактическая концентрация на постах, осредненная по всем реализациям на данном направлении; c_n^{calc} — расчетные значения c , спроецированные из сеточных узлов в точки местоположения постов (для сопоставления использовался уровень измерений $z = z_2$, соответствующий 2-метровой высоте над поверхностью). Искомым считалось решение $c(x, y, z)$, при котором функционал (4) достигает минимального значения из всех возможных.

Уравнение (1) интегрировалось по времени до момента выхода решения на стационарный режим. Ввиду высокой ресурсозатратности трехмерной модели целесообразно исследовать чувствительность и определить «вилку» оптимальных значений параметров в упрощенном варианте задачи, когда влияние рельефа не учитывается ($\delta = 0$). В этом случае ветер считается квазиоднородным по территории, а его вертикальный профиль рассчитывается из модели приземного слоя [6], в которой город параметрически учтен увеличенным значением шероховатости.

Минимизация двухпараметрического функционала для каждого из восьми румбов проводилась методом градиентного спуска: при фиксированных значениях K_x, K_y изменялась величина скорости переноса в направлении убывания Φ . Характер зависимости Φ от скорости переноса иллюстрирует рис. 2, а, из которого видно, что оптимальное значение скорости в данном случае близко к 0,42 м/с, причем с увеличением $|u|$ ошибка быстро возрастает. (Заметим, что оптимальные значения во всех случаях не превышали 0,7 м/с, что подтверждается фактом формирования высоких концентраций лишь в условиях, близких к штилевым.)

Найденный оптимум скорости фиксировался и служил отправным значением для продолжения оптимизации по коэффициентам диффузии. Описанная процедура циклически повторялась до момента нахождения оптимальной совокупности с заданной точностью. Столбчатая диаграмма на рис. 2, б показывает концентрации, полученные в отдельных численных экспериментах расчетного цикла. Последняя колонка в каждой группе показывает измеренную концентрацию на каждом из шести постов, стоящие впереди столбики характеризуют модельную концентрацию в приближающих расчетах.

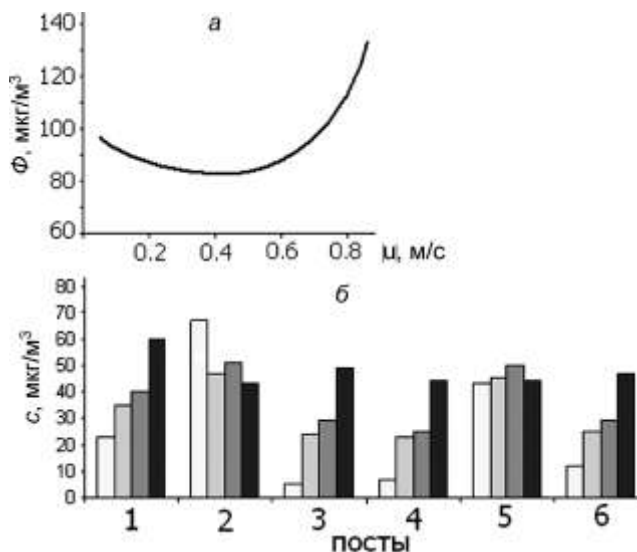


Рис. 2. *a* — изменение функционала ошибок Φ при вариациях скорости; *б* — расчетные концентрации на постах в последовательности оптимизирующих экспериментов при юго-западном ветре

Для получения оптимальных сочетаний параметров при минимизации ошибок проводилось несколько десятков пробных расчетов для каждого из восьми направлений ветра. Набор данных сохранялся для последующего использования при решении полной задачи.

Модель ветрового режима

Правый берег р. Томь, на котором расположена основная часть города, имеет сложную орографическую структуру — долины речных притоков формируют пересеченный рельеф с перепадами высот до 150 м. Небольшая речка Ушайка, впадающая в Томь, глубоким каньоном делит правобережную часть города на две части. Заметная впадина образована и другим притоком — Большой Киргизкой, расположенной к северу. Ряд внегородских долин также формируют понижения рельефа в поперечном к руслу Томи направлении (см. рис. 1, б). В силу значительной орографической неоднородности подстилающей поверхности скоростная структура потока не является постоянной в плане, а деформируется за счет эффектов обтекания и подлежит расчету в рамках динамической модели.

Для нижних слоев атмосферы Томска характерным является устойчивое распределение температуры с высотой. Повторяемость температурных инверсий в Западной Сибири составляет 50—60 % [1], практически во все сезоны в Томске наблюдается слой с устойчивой стратификацией и инверсионной прослойкой, которая препятствует вертикальному обмену воздушных масс и переносу примеси в верхнюю атмосферу. Это обстоятельство позволяет пренебречь эффектами вертикального обмена между слоями и рассматривать устойчивый пограничный слой как тяжелую жидкость, расположенную под более легкой жидкостью, и перейти к однослойной аппроксимации физических процессов.

Структура турбулентного потока над различными типами подстилающей поверхности в настоящее время хорошо изучена экспериментально и теоретически. В приземном слое с высокой точностью выполняются соотношения подобия, согласно которым динамические параметры потока подчиняются автомодельным зависимостям вида [7]

$$K_z \frac{\partial u}{\partial z} = c_d |u| u, \quad K_z \frac{\partial v}{\partial z} = c_d |u| v, \quad (5)$$

где c_d — коэффициент трения потока о неровности подстилающей поверхности. Опираясь на факт подобия процессов по вертикали, трехмерную структуру гидродинамических полей аппроксимируем в виде

$$\phi(x, y, z, t) = \phi_1(x, y, t) \cdot \phi_2(z), \quad (6)$$

где вектор-функцию ϕ_2 будем считать безразмерной величиной со структурой, определенной универсальными функциями. Примем толщину устойчивого слоя h в качестве искомой переменной: $h = h(x, y, t)$. Уравнение для определения компонентов ϕ_1 получим путем подстановки (6) в уравнения гидродинамики пограничного слоя атмосферы и их осреднения по вертикали от $z = \delta$ до $z = h$. Отбрасывая индекс «1» у переменных, уравнения движения и неразрывности запишем в виде [8]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu u}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} = \\ & = -\lambda \cdot \Delta T \cdot h \frac{\partial (h + \delta)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} h K_x \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} h K_y \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_x - c_d |u| u, \\ & \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial h v v}{\partial y} = \\ & = -\lambda \cdot \Delta T \cdot h \frac{\partial (h + \delta)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} h K_x \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} h K_y \frac{\partial v}{\partial y} + \tau_y - c_d |u| v, \end{aligned}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial u h}{\partial x} + \frac{\partial v h}{\partial y} = 0, \quad (7)$$

где $\Delta T > 0$ — вертикальный перепад температур между устойчивым приземным слоем и вышележащей свободной атмосферой; λ — параметр плавучести; τ_x, τ_y — ветровые напряжения на верхней границе слоя; c_d — коэффициент сопротивления.

Условия на боковых границах области для системы (7) сформулируем в виде

$$\frac{\partial u}{\partial n} = \frac{\partial v}{\partial n} = 0, \quad h = h_\Gamma \quad \text{при } (x, y) \in \Gamma^+, \quad (8)$$

где Γ^+ — участки втекания потока в область, величина h_Γ характеризует среднее (по реализациям) значение толщины устойчивого слоя.

Движущие силы в системе обусловлены касательными напряжениями τ_x, τ_y , которые необходимо задать как независимые внешние параметры. Процедура оптимизации, описанная выше, проводится теперь в терминах величин τ_x, τ_y , которые регулируют амплитуды скоростей по области и, в частности, на постах наблюдения. Восстановление полей ветра проводилось интегрированием уравнений (7) на установление. На реальном рельефе расчетные скорости заметно отклоняются от постоянных значений и параметры τ_x, τ_y приходилось пересчитывать, т. е. подбирать опытным путем так, чтобы скорость ветра была близка к оптимальной. По сравнению с упрощенным вариантом прямого задания скоростей сложность оптимизации здесь значительно возрастает за счет организации дополнительного временного цикла, обеспечивающего решение задачи (7)—(8).

Трение о подстилающую поверхность c_d определялось в ходе расчета параметров приземного слоя. Необходимые для модели морфометрические данные по исследуемой территории выбирались с 3-секундным разрешением (92,5 м) из сетевых ресурсов и интерполировались на расчетную сетку.

Расчет средней годовой концентрации формальдегида проводился в следующем порядке. Для каждого из направлений ветра решалась система динамических уравнений с некоторыми значениями параметров τ_x, τ_y и рассчитывалось среднее по толщине устойчивого слоя распределение скорости ветра на территории. Трехмерная структура скоростей и коэффициентов вертикального обмена K_z восстанавливалась с помощью универсальных функций модели приземного слоя. Полученные поля использовались как гидродинамическая основа при интегрировании уравнения переноса и диффузии примеси. Значения концентрации

формальдегида подставлялись в соотношение (4) для вычисления текущей ошибки. Последняя сравнивалась с ранее полученными значениями Φ , что позволяло определить вектор градиента в пространстве оптимизируемых параметров и повторить процедуру с обновленными величинами τ_x, τ_y, K_x .

Каждое из восьми направлений ветра характеризовалось собственным набором данных наблюдений c_n^{fact} , оптимальная совокупность параметров также индивидуализирована по румбам. Результирующее поле концентрации представляет характерное распределение формальдегидной нагрузки по городу в экстремальных эколого-метеорологических ситуациях, реализация которых возможна с вероятностью, отвечающей доле данного румбового направления в розе слабых ветров. Например, для северного ветра эта вероятность равна 0,054. Важно отметить, что построенные поля согласованы с данными наблюдений, т. е. в точках местоположения постов расчетные значения концентрации совпадают или близки к фактическим.

Если провести весовую суперпозицию восьми частных полей по всему кругу направлений, то получим некоторое среднееождаемое годовое поле концентрации, единое для всех направлений ветра. Рисунок 3, а иллюстрирует расчетное распределение среднегодовых экстремальных

концентраций в терминах нормированных значений $\bar{c} = \frac{c}{\text{ПДКсс}}$. Видно,

что область влияния основных источников эмиссии покрывает практически всю территорию города, где средняя концентрация изменяется в пределах 5—18 ПДК. Экстремально высокое содержание формальдегида наблюдается в центральной и южной частях города, а также в непосредственной близости от нефтехимического комбината. Шлейф максимальных концентраций вытянут в северном направлении в соответствии с господствующими юго-западными ветрами.

Для сравнения на рис. 3, б построен аналог поля $\bar{c}$, полученный применением модели ОНД-86 с равными значениями прочих параметров. Из рисунка можно видеть, что зона влияния источников заметно уменьшилась, понизился и максимум концентраций до 8—12 ПДК. Конфигурация шлейфа приобрела гладкий овальный вид, причем геометрический центр овала совпадал с местоположением основного точечного источника. Концентрация формальдегида в городе не превышает значения 1 ПДКсс.

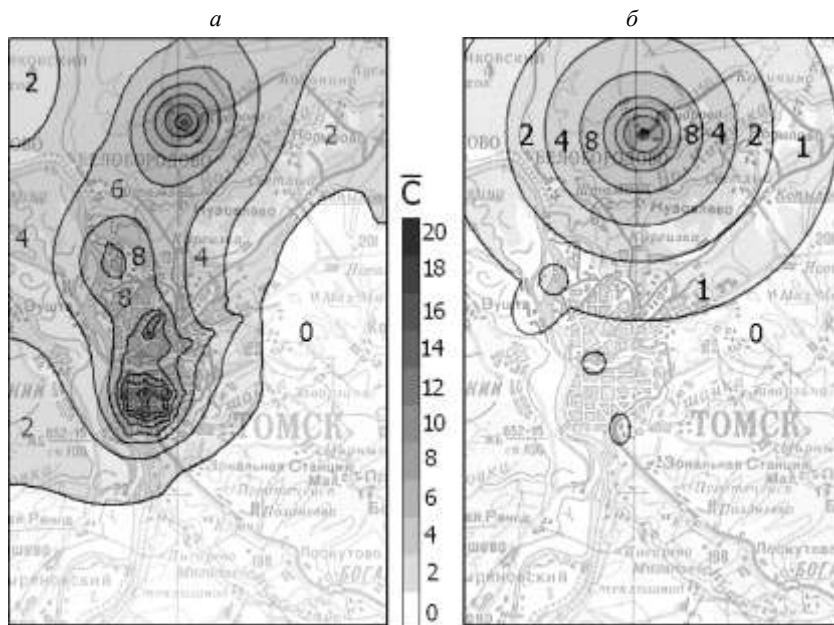


Рис. 3. а — расчетное поле среднегодовой концентрации формальдегида (в единицах ПДКсс) на уровне $z = z_2$; б — поле концентрации, полученное по модели ОНД-86

Сопоставляя поля $\bar{c}$ на рис. 3, приходим к выводу, что наличие сложного рельефа вблизи г. Томска обуславливает повышение концентрации формальдегида и приводит к ухудшению экологической обстановки в городе по сравнению с гипотетическим вариантом расположения города на орографически однородной местности. Унифицированная модель ОНД-86 ориентирована на оценки максимально возможных концентраций на плоскости и дает заметные ошибки (в данном случае — занижение концентрации) при расчетах на сложнопереесеченном рельефе.

Влияние автотранспорта на концентрацию формальдегида в городе довольно велико и по разным оценкам составляет 50—77 %. С помощью измерений решить задачу идентификации выбросов автотранспорта невозможно. Применяемые подходы позволяют более обоснованно оценить вклад этого фактора в общий бюджет формальдегидного загрязнения. С этой целью проведен сценарный цикл расчетов, в которых учитывались только выбросы автотранспорта, а остальные источники эмиссии (предприятия) отключались. С помощью калиброванной выше численной модели получена картина концентрации, обусловленной автотранспортом. Влияние бензиновых выхлопов ограничено чертой города, причем в центральной части концентрация достигает 10—12 ПДКсс и оказывается сопоставимой с общим фоном экстремальных ситуаций. По результатам расчетов вклад автотранспорта можно оценить в 50—80 % по отношению к суммарной концентрации от всех источников, что соответствует данным других исследований.

Заключение

На основе численной гидродинамической модели рассчитано распределение средних экстремальных концентраций формальдегида, выбрасываемого в г. Томске. Калибровка параметров выполнена на основе методов оптимизации и обеспечивает адекватность расчетных характеристик данным измерений концентрации на постах. Полученные оценки содержания формальдегида в городской атмосфере представляются реалистичными как в свете литературных данных, так и фактических материалов.

Возможности модели позволяют получать относительные оценки вклада отдельных предприятий или групп источников (в том числе выбросов автотранспорта) в общее загрязнение городской атмосферы. Алгоритм может быть использован как компонент экспертных систем или систем поддержки принятия управленческих решений, в частности, при

разработке профилактических мероприятий, способствующих повышению качества воздуха.

Литература

1. *Селегей Т.С.* Формирование уровня загрязнения атмосферного воздуха в городах Сибири. Новосибирск: Наука, 2005. 347 с.
2. *Методика* расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий (ОНД-86). Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 93 с.
3. *Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей.* Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 351 с.
4. *Шлычков В.А., Бородулин А.И., Десятков Б.М.* Численное моделирование циркуляции воздуха и переноса примеси в городских агломерациях с явным учетом ландшафта // *Оптика атмосферы и океана.* 2005. Т. 19, № 6. С. 552—556.
5. *Harten A.* On a class of high resolution total-variation-stable finite-difference schemes // *SIAM Journal of Numerical analysis.* 1984. V. 21, N 1. P. 1—23.
6. *Пененко В.В., Алоян А.Е.* Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 256 с.
7. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. Т. 1. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 694 с.
8. *Гутман Л.Н.* Введение в нелинейную теорию мезометеорологических процессов. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 295 с.

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГОДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛОБАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Л.Н. Романов

*ГУ «Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт», г. Новосибирск*

Введение

Основным инструментом крупномасштабного моделирования атмосферы являются, прежде всего, уравнения в частных производных. Система гиперболического типа (примитивная система уравнений), связывающая основные элементы погоды, позволяет исследовать различные типы волн, а также строить модели прогнозов для различных заблаговременностей. При этом каждую такую модель, кроме временных и пространственных масштабов рассматриваемых процессов, будут определять граничные и начальные условия, задаваемые в виде непрерывных функций. Однако сама система уравнений в частных производных для описания процессов является некоторой идеализацией процессов, реально происходящих в природе. Эта идеализация имеет место, когда таким величинам, как производные, градиенты и плотности, полученным в результате предельного перехода, приписывается физический смысл. Для упрощения описания окружающего нас физического мира такая идеализация необходима и в рамках использования гидродинамического подхода, по-видимому, неизбежна [1].

В рамках статистического подхода также имеет место идеализация действительности, главная из которых — это приписывание экспериментальной выборке какого-нибудь закона распределения вероятностей, согласно которому эта выборка образуется. И если в некоторых случаях задача решается без привлечения какого-нибудь закона распределения, то обойтись без статистического оценивания, также всегда связанного с предельным переходом, никак нельзя. Кроме того, решение задач с помощью дифференциальных уравнений предполагает априори существование и единственность решения, что накладывает определенные ограничения на использование гидродинамического подхода на практике.

В случае же статистического подхода подобных ограничений нет, поскольку существование решения проверяется при построении с по-

мощью статистических критериев, а вопрос единственности не стоит так остро, поскольку решается в каждой конкретной задаче путем статистического оценивания результатов построений.

Заметим также, что использование дифференциальных уравнений для целей моделирования предполагает известными граничные и начальные условия, задаваемые в виде непрерывных функций, которые при моделировании атмосферы, как правило, неизвестны. Использование для этой цели дискретной информации требует предварительной специальной обработки и нестандартных статистических решений. Кроме того, требуются конечно-разностное представление производных функции и разработка методов решения разностных уравнений.

Здесь наблюдается двойной переход в прямом и обратном направлении: сначала мы идеализируем действительность, составляя, таким образом, дифференциальные уравнения, а затем, отталкиваясь от этих уравнений, переходим к дискретному случаю и рассматриваем разностные уравнения, которые в конечном итоге приводят к алгебраическим.

В условиях, когда исходная информация представляет собой дискретные данные, подобный переход не может вызывать оптимизма с точки зрения конечных результатов моделирования. Более того, возникает желание начинать построения, сразу отправляясь от алгебраических систем, используя для этого данные наблюдений, снятые в дискретных точках. Однако для этого необходим математический аппарат, который, опираясь на исходные данные, заданные в дискретных точках, позволял бы моделировать процессы любых масштабов и таким образом строить модели предсказания элементов погоды для различных заблаговременностей. Результаты восстановления функций по данным, полученным за последние годы [2, 3, 4, 5], позволяют надеяться, что такой аппарат существует и может быть эффективно использован при крупномасштабном моделировании атмосферы.

В настоящей статье делается попытка формализовать процесс построения глобальных моделей погоды без использования дифференциальных уравнений.

Постановка задачи

Предположим, что в атмосфере действует некоторый закон, связывающий основные элементы погоды, как в пространстве, так и во времени. В случае, когда детерминизм процессов не предполагается заранее, подобное предположение нас ни к чему не обязывает, тем более из опыта моделирования атмосферы нам уже известно, что элементы погоды как-то связаны между собой. В этом случае для любого из прогнози-

руемых элементов T , а также для всех параметров Q , от которых этот прогнозируемый элемент может зависеть, можно записать равенство

$$T(X, t + \Delta t) = \varphi(Q(X, t)), \quad (1)$$

где X — вектор координат (x, y, z) ; φ — неизвестная функция, по предположению определяющая элемент погоды T в момент времени $t + \Delta t$. Можно предположить, что время прогноза t также фиксировано $t = t_0$ и шаг по времени имеет вполне конкретное значение. Этим мы также не ограничиваем общность подхода, поскольку если задача будет решена для конкретных t_0 и Δt , то она будет решена и для других соответствующих значений.

Расширим далее область поиска φ , предположив, что совокупность параметров Q может зависеть не только от некоторого фиксированного $t = t_0$, но от некоторого t из интервала $(t - \lambda t) \leq t \leq t_0$, что имеет важное значение для более полного описания перемещения воздушных масс. Таким образом, количество компонент Q может измеряться не только числом измерений в точке X в момент t_0 , но и числом аналогичных измерений в этой точке в некоторые моменты $t \leq t_0$. Интервал, в который попадают измерения, могущие вносить вклад в прогнозируемое значение $T(X, t_0 + \Delta t)$, представляет собой по существу интервал предистории процесса в данной точке X . Учитывая сказанное, равенство (1) можно переписать в виде

$$T(x, y, z)|_{t=t_0+\Delta t} = \varphi(Q(x, y, z, t))|_{t \leq t_0}, \quad (2)$$

полагая, что неизвестная функция φ непрерывна и, следовательно, интегрируема с квадратом. Можно было бы попытаться аппроксимировать ее некоторой другой функцией $\hat{\varphi}$, минимизируя для этого функционал

$$I(\hat{\varphi}) = \int (\varphi - \hat{\varphi})^2 dx dt. \quad (3)$$

Но поскольку об этой функции нам ничего неизвестно, кроме того что она должна быть согласована с исходными данными, которые к тому же измеряются с ошибками, естественно было бы предположить существование приближенного закона, который выполняется с некоторой вероятностью. В этом случае мы будем минимизировать не функционал (3), а функционал

$$I(\hat{\varphi}) = \int (\varphi - \hat{\varphi})^2 P(T, Q) dT dQ, \quad (4)$$

где

$$P(T, Q) = P(Q, T)P(Q).$$

Здесь $P(Q|T)$ — условная плотность распределения вероятностей.

Выполнение закона с некоторой вероятностью означает, что некоторому вектору Q из соответствующего распределения ставится в соответствие закон $P(T|Q)$, согласно которому в случайном и независимом испытании реализуется выбор T . Таким образом, связь между Q и T определяется как статистическая, и для нахождения ее надо определить минимум не функционала (3), а функционала (4). Функционал $I(\varphi)$ принято называть средним риском, соответствующим неизвестной функции φ .

Минимизация функционала (4) могла бы позволить нам определить функцию $\hat{\varphi}$, обладающую нужными нам оптимальными свойствами:

$$I(\hat{\varphi}) = \min_{\varphi} I(\varphi),$$

где минимизация осуществляется по всем возможным параметрам, от которых функция φ может зависеть.

Однако прямая минимизация функционала (4) невозможна, потому как функция распределения плотности вероятностей нам неизвестна. Поэтому на практике минимизируют не функционал (4), а оценку этого функционала. Такая оценка может быть получена либо теоретически, либо путем прямого оценивания, как это изложено в работе [2]. Во всех случаях оценка выражается в виде

$$I(\varphi) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{T_i - \varphi(Q_i)}{F(Q_i)} \right)^2, \quad (5)$$

где F — известная функция вектора $Q(N, m)$, представленного исходными ситуациями

$$Q_1, Q_2, \dots, Q_N, \quad (6)$$

$T_1, T_2, \dots, T_N$ — известные значения прогнозируемого элемента T . В случае прямого оценивания функция F имеет вид

$$F(Q) = \left(1 + Q_i B^{-1} Q_i^T - \frac{1}{N} \right),$$

где B — ковариационная матрица исходных параметров (6). Таким образом, если минимум (5) будет найден:

$$I(\hat{\varphi}) = \min_{\varphi} I(\varphi), \quad (7)$$

то среднюю ошибку (средний риск) будет представлять выражение

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \frac{T_i - \tilde{\varphi}(Q_i)}{1 - Q_i B^{-1} Q_i^T - \frac{1}{N}} \right)^2}, \quad (8)$$

и соответствующая функция $\tilde{\varphi}$ будет аппроксимировать поле T по всей области в момент времени $t_0 + \Delta t$. Далее аналогичным образом могут быть спрогнозированы и другие элементы погоды и получены соответствующие функции φ , аппроксимирующие другие поля. Так, например, если предполагается прогнозировать k полей, то будут получены k функций $\tilde{\varphi}_1, \dots, \tilde{\varphi}_k$, аппроксимирующих эти поля и, таким образом, может быть сделан шаг на Δt единиц времени вперед:

$$T^l(X, t + \Delta t) = \tilde{\varphi}_l(q^l(X, t))|_{t \leq t_0}, \quad (l = 1, \dots, k),$$

где q^l — подвыборка параметров из Q^l , доставляющая минимум функционалу (8).

Заметим, что минимизация (5) может осуществляться не только по выборке параметров из Q , но и по различным классам функций, которым искомая φ может принадлежать. На практике нет необходимости перебирать широкие классы функций для целей аппроксимации, поскольку полином с целочисленными степенями аппроксимирует любую непрерывную функцию с любой наперед заданной точностью. Главное при этом, чтобы степени параметров и коэффициенты полиномов доставляли минимальное значение оценке среднего риска (5). Таким образом, если подставить в функционал (5) полином некоторой допустимой степени, то после оптимизации будем иметь некоторый другой полином, существенно более простой:

$$\phi^m = \sum_{i=1}^m \alpha_i (x_1^{k_1}, \dots, x_p^{k_p}), \quad (0 \leq k_p \leq n),$$

в котором коэффициенты $\alpha_1, \dots, \alpha_m$ представляют собой рациональные числа, могущие принимать также и нулевые значения. При этом каждый параметр $x_i^{k_j}$ может входить в состав произведения

$$x_1^{k_1}, \dots, x_p^{k_p}$$

с любой целочисленной степенью $k_i (0 \leq k_i \leq n)$, где n — максимально допустимая степень полинома. Последние два замечания имеют принципиальное значение, поскольку именно это отличает рассматриваемую полиномиальную аппроксимацию от обычной полиномиальной регрессии. Фактически, вхождение какого-либо из исходных параметров в

моном с нулевой степенью означает его там неприсутствие, а нулевые значения какого-либо из коэффициентов α_i означают неинформативность соответствующего монома. Таким образом, если нам удастся достижение глобального минимума оценки (5), то в условиях применения полинома мы фактически используем только одно предположение — искомая функция φ непрерывна.

Глобальное прогнозирование

В общем виде задачу можно неформально представить следующим образом: имеется глобальная информация, снятая на некотором интервале времени, требуется восстановить пространственно-временные связи, которые бы с удовлетворительной точностью выполнялись не только внутри этого временного интервала, но и в определенной степени за его пределами.

Очевидно, для подобных построений и создания эффективных прогностических моделей необходим инструмент, который позволял бы обобщать большие ряды данных и получать решения в виде функций, удовлетворяющих требуемым статистическим критериям. Другим важным фактором являются исходные данные, которые, как правило, недостаточны для целей глобального моделирования. В этих условиях вопрос об оптимальном использовании исходных данных играет чрезвычайно важную роль.

Строя глобальную модель прогноза, постараемся задействовать всю имеющуюся информацию в той степени, в которой она может быть полезна для моделирования, или, иначе говоря, в той степени, в которой она способствует уменьшению оценки среднего риска. Для этой цели уравнение для определения аппроксимирующей функции

$$T(V, t_0 + \Delta t) = \varphi(V, t_0)$$

распишем во всех точках, в которых измерены данные. При этом число таких уравнений N будет многократно превосходить число возможных параметров m ($N \geq m$), от которых потенциально может зависеть аппроксимирующая функция. Соотношение числа уравнений и числа параметров ($N \geq m$) вселяет в нас уверенность, что проблемы с вырожденностью ковариационных матриц при нахождении функции φ не возникнут. С другой стороны, если брать все слои исходных данных в хронологическом порядке, то распределение ситуаций, каждая из которых представляет набор данных в определенной точке, должно отличаться большой сложностью, и это, несомненно, повлечет за собой усложнение самой восстанавливаемой функции. Сложность же аппроксимирующей

функции в условиях ошибок измерений, которые всегда присутствуют в экспериментальных данных, никак нельзя рассматривать как положительный фактор.

Постараемся упростить распределение ситуаций, каждая из которых представляет теперь набор данных в одной географической точке. Для этой цели используем циклический характер изменения состояния атмосферы.

Пусть имеется многолетний ряд глобальных данных, измеренных через интервал времени Δt . Пусть для определенности этот интервал равен трем часам. Выберем из этого многомерного ряда подряд каждый 12-й его временной слой, начиная с первого.

В результате получим некоторый новый ряд, который в 12 раз короче исходного, в котором каждый его член будет соответствовать какому-либо одному месяцу. Далее, из полученного таким образом ряда получим новый ряд, выбирая из предыдущего ряда каждый 30-й его член. Полученный таким образом ряд будет приблизительно в 30 раз короче предыдущего. Из полученного ряда можно выбрать через каждые 8 членов еще один ряд, который будет в 8 раз короче предыдущего. Такой ряд будет соответствовать данным, измеренным в определенный месяц года, в определенное число месяца и в определенный интервал суток. Очевидно, что многомерное распределение, которое представлял исходный ряд, будет значительно упрощено, поскольку исключены все явные атмосферные циклы, связанные с годовым, месячным или суточным ходом метеорологических элементов. Можно также исключить и другие циклы, если это позволит сделать размеры исходного временного ряда.

Полученный таким образом короткий временной ряд содержит небольшое число членов, но если из этого ряда для каждой точки, в которой осуществляются измерения, сформировать ситуации, то таких ситуаций будет очень много, поскольку даже одному временному слою могут соответствовать тысячи ситуаций. Поэтому можно ожидать, что на основе сформированных ситуаций может быть получено устойчивое решение φ , позволяющее спрогнозировать соответствующий элемент погоды на один шаг вперед.

Оценка среднего риска для каждой очередной функции φ может производиться как на всех ситуациях одного временного слоя, так и сразу на многих слоях внутреннего цикла. Очевидно, эти оценки могут между собой различаться, поскольку ситуации одного слоя не являются полностью независимыми, тогда как сами слои, находящиеся друг от друга на значительном по времени расстоянии, можно считать практи-

чески независимыми. Поэтому крайне желательно строить функцию и осуществлять оценку аппроксимации, используя весь доступный материал внутреннего цикла. Еще более интересно было бы знать при этом оценку аппроксимации для каждого внутреннего слоя, так чтобы после каждого очередного шага по времени мы могли быть уверены в целесообразности счета. В работе [2] изложен метод группового скользящего контроля, который позволяет не только оценивать отдельно слои временного ряда, но и строить аппроксимирующую функцию исходя из оценки суммарной ошибки скользящего контроля, полученной по всем группам ситуаций. Ошибка группового скользящего контроля представляется в этом случае в виде

$$\Delta_{\text{гр}} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r (\lambda_k^{(j)})^2},$$

где внутреннее суммирование осуществляется по числу элементов в группе, а внешнее — по числу групп. Число элементов в группе в случае глобального прогнозирования должно представлять собой число точек измерений в атмосфере в определенный момент, число же групп — это число лет, которые используются для аппроксимации.

Просеивая аналогичным образом исходный ряд глобальных наблюдений, мы сможем восстановить и другие функции ϕ_i для шагового прогноза других прогнозируемых элементов T_i . В результате будем иметь формулы

$$\begin{aligned} T_1(t_0 + \Delta t, V) &= \phi_1(Q(t_0, V)), \\ &\dots\dots\dots \\ T_l(t_0 + \Delta t, V) &= \phi_l(Q(t_0, V)). \end{aligned}$$

Сделав таким образом шаг по времени на три часа вперед и получив при этом прогностические значения $T_1, \dots, T_l$, будем иметь условия для того, чтобы сделать шаг по времени вновь и получить при этом новые прогностические значения. При этом мы должны перед каждым очередным нахождением аппроксимирующих функций ϕ_i вновь осуществлять просеивание членов исходного временного ряда и на основе упрощенного распределения находить новые аппроксимирующие функции для каждого из прогнозируемых элементов.

Шаг по времени в три часа был выбран в данном случае для примера. В реальных моделях этот шаг должен выбираться исходя из реальных условий сбора и хранения данных, учитывая при этом масштабы прогнозируемого процесса. Для прогноза элементов погоды на месяц, сезон или год шаг по времени может быть выбран достаточно большим, если же прогноз считается до десяти суток, шаг нужно выбирать ми-

нимальным, но не менее интервала, через который осуществляются измерения.

Здесь мы видим аналогию с прогнозами по гидродинамической схеме, когда счет идет шагами по времени. Действительно, если вынести в левую часть уравнения движения частную по времени, производную от прогнозируемого элемента, а в правую часть — все остальные члены уравнения, от которых эта производная может зависеть, то можно записать

$$\frac{\partial T}{\partial t} = A(X),$$

где X — некоторый вектор; A — дифференциальный оператор, в который должны входить конвективные члены и некоторые другие производные или параметры.

Распишем это уравнение в частных производных:

$$\frac{T_{t+\Delta t} - T_t}{\Delta t} = \bar{A}(X),$$

где $\bar{A}$ — конечно-разностный оператор, соответствующий дифференциальному оператору A . Тогда, оставляя предсказываемое значение в левой части и перенося все остальное в правую, будем иметь

$$T_{t+\Delta t} = T_t + \Delta t \bar{A}(X).$$

Принципиальным отличием является то, что в статистическом случае функция ϕ , с помощью которой делается шаг по времени, получается из опыта, а в случае гидродинамической модели соответствующий оператор получается из теоретических рассуждений. Однако гидродинамическая схема может быть легко синтезирована в описанную статистическую схему. Для этого надо лишь значение разностного оператора $\bar{A}$ в различных точках включить в качестве самостоятельного параметра в вектор Q . Минимизация среднего риска при этом должна показать, какой вклад вносит гидродинамическая модель в общую синтезированную модель, и насколько такое включение целесообразно.

Заключение

В заключении сформулируем основные отличия и основные преимущества нового подхода по сравнению с традиционными методами глобального прогнозирования. Сравнения с другими статистическими методами глобального прогнозирования едва ли в данном случае уместны, ввиду того что глобальный прогноз до сих пор был связан лишь с

гидродинамическими методами. Что же касается гидродинамического подхода, то главное преимущество состоит в том, что нет необходимости вычислять производные, что связано с идеализацией действительности и необходимостью решения некорректных задач. Кроме того, нет необходимости оперировать системой разностных уравнений, что связано с решением проблемы устойчивости разностных схем. Вопрос существования и единственности решения в данном случае не стоит так остро, как это имеет место при гидродинамическом моделировании, поскольку его существование определяется в процессе построений, а единственность проверяется с помощью эффективных статистических критериев. Эти же статистические критерии могут пролить свет и на устойчивость решения, которое также является необходимым условием гидродинамических построений.

Выбор шага по времени и пространству при решении систем дифференциальных уравнений приходится делать из соображений устойчивости разностных схем, что напрямую не связано с целями построений. В описанной же конструкции проблема выбора шага по времени и пространству вообще не стоит, поскольку этот выбор полностью диктуется структурой поступающей гидрометеорологической информации. В случае сверхдолгосрочных прогнозов, когда прогнозируются осредненные характеристики, шаг по времени может быть значительно увеличен, однако он по-прежнему должен оставаться кратным временному интервалу измерения параметров.

Отсутствие дополнительных этапов в построениях, которые, как правило, не вписываются в единый контролируемый вычислительный процесс, такие как согласование полей или объективный анализ, является несомненным достоинством описанного подхода по сравнению с гидродинамическими методами. Основное же достоинство подхода состоит в том, что весь процесс построения модели контролируется с помощью единого критерия (критерий среднего риска), и этот критерий напрямую связан с конечной целью построений. Все это позволяет надеяться на успешное применение подхода при глобальном моделировании.

Литература

1. Курант Р., Гильберт Д. Методы математической физики. Т. 1. М.; Л.: Гостехиздат, 1951.
2. Поляков Г.Г., Романов Л.Н. Скользящий контроль и линейная регрессия // Метеорология и гидрология. 1988. № 9.
3. Романов Л.Н. О пространственных статистических моделях, прогнозирующих трехмерные поля // Труды ЗапСибНИГМИ. 1988. Вып. 83.
4. Vapnik V. Statistical Learning Theory. N. Y.: John Wiley, 1998. P. 732.

5. *Романов Л.Н.* Минимизация риска и восстановление пропусков в атмосферных данных // Сиб. журн. вычисл. математики. 2009. Т. 12, № 2.

ДИНАМИКА ГЛОБАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 150 ТЫСЯЧ ЛЕТ

С.П. Казьмин¹, И.А. Волков²

¹ ГУ «Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт», г. Новосибирск

² Институт нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск

Без надлежащего знания прошлого нельзя правильно оценить настоящее и тем более прогнозировать будущее. Широко используемый в науке термин «климат» — многокомпонентный. Он включает в себя АПЭ — астрономический приток энергии (т.е. приток энергии из космоса), КВ — круговорот воды (в действительности и энергии тоже), ПЭ — приток энергии к земной поверхности, ГТБ — гидротермический баланс поверхности Земли (включая также почвенный покров и геолого-геоморфологическую основу ландшафтов, ГГОЛ). Этот термин характерен для *определенного времени и определенной территории*. Между тем большинство палеогеографических реконструкций до настоящего времени целиком базируется именно на сложном термине. Таковы оценки чередования холодных и теплых состояний географической оболочки на палеотемпературной кривой СПЕСМАР [1] и изотопно-кислородной кривой Индийского океана [2]. Периоды похолоданий на кривых выделены в виде четных, а потеплений — нечетных стадий МИС (морских изотопных стадий) или ИКС (изотопно-кислородных стадий). Широко используется этот термин и в иных палеогеографических построениях, хотя и обладает некоторой неопределенностью. В действительности необходимы качественные, количественные и временные оценки всех климатических факторов.

Основными климатическими факторами являются энергетические. Они первичны и исходны. Все остальные характеристики по отношению к ним вторичны и являются их следствиями. Среди энергетических факторов основным является АПЭ. Именно приток энергии из космоса определял, определяет и будет определять всю структуру и все процессы географической оболочки [3—5]. Это положение твердо установлено исследованиями с начала второй половины прошлого века. След-

ствия этого основного фактора (в том числе и энергетические) проявляются в природе с различной скоростью. В связи с этим оставлять в стороне фактор времени при оценке палеоклимата нельзя.

Прямые установленные и непосредственно наблюдаемые климатические особенности прошлого и настоящего, такие как ГТБ, облик биоты природы, строение почвенного покрова и характер ГГОЛ, представляют собой результат динамики энергетического фактора, включающего АПЭ и его непосредственные следствия (КВ и ПЭ). Характерен, например, феномен катастрофического вымирания многих групп биоты на границе мезозоя и кайнозоя. В результате многолетних исследований в Западной Сибири и Казахстане мы считаем твердо установленным, что это вымирание связано с существенным сокращением АПЭ в конце мезозоя [6, 7]. Все попытки объяснить это вымирание без учета данного астрофизического события считаем ошибочными.

Не менее очевидными являются и данные, отраженные на энергетической кривой СПЕСМАР по квартету [1]. На определенных участках кривой приблизительно через каждые 100 тысяч лет выделяются взлеты АПЭ от минимума к максимуму. Именно на них происходят наиболее грандиозные перестройки географической оболочки Земли. На промежуточных интервалах они не достигают ни наименьших, ни наибольших состояний. Колебания АПЭ имеют различные амплитуду и длительность. Соответственно этому различны и выявленные следствия таких колебаний. Наиболее максимальными по амплитуде являются сравнительно кратковременные изменения АПЭ, в особенности быстрые переходы от минимума к последующему максимуму.

ПЭ и АПЭ близки по значению, но они объединяют причину и ее следствия. На основании изучения субаэральной формации, включающей не только толщу лессовых покровов, но и особенности строения всей этой формации, была доказана неточность анализа энергетической кривой СПЕСМАР. Она исходит из анализа климата, т. е. многокомпонентного фактора. Было предложено анализировать подобные кривые как чередование циклов не похолоданий, а потеплений. Завершением каждого такого цикла являлась четная МИС (или ИКС), а началом — нечетная стадия [8]. Начало каждого климатического цикла — резкое возрастание АПЭ, окончание — достижение минимального притока АПЭ, т. е. эпохи криогенеза. Отсюда — ошибки в оценках динамики биоты ландшафтов и всей географической оболочки только по климатическому фактору. Правильно рассматривать циклы потеплений. Началом каждого из них являлось резкое и быстрое возрастание АПЭ, т. е. то, что принято считать «терминацией». В действительности это следу-

ет считать началом последующего цикла потепления. Это ясно видно как на стандартной морской изотопно-кислородной шкале SPECMAP [1], так и на кривой изотопных отношений $\delta^{18}\text{O}$ Индийского океана [2].

Регион Западной Сибири весьма обширен. На основании его изучения наряду с региональными заключениями возможно выявить и некоторые особенности всей географической оболочки в целом. Именно с таким подходом авторы позволяют делать выводы также и глобального характера. Для правильной оценки реально выявленных природных событий позднего неоплейстоцена и голоцена, т. е. последних 150 тыс. лет, необходим анализ энергетического фактора, отраженного на вышеуказанных кривых. Рассматриваемому интервалу времени предшествовала МИС 6 (рис. 1). Это было глубокое минимальное состояние АПЭ, самое длительное за всю палеомагнитную эпоху Брунес. Оно продолжалось от 180 до 140 тыс. л. н. Следствием его в Западной Сибири и иных регионах умеренных поясов явилось максимальное среднелепесточное (в Сибири — самаровское) континентальное оледенение. Южная граница его тогда располагалась, как теперь твердо установлено,

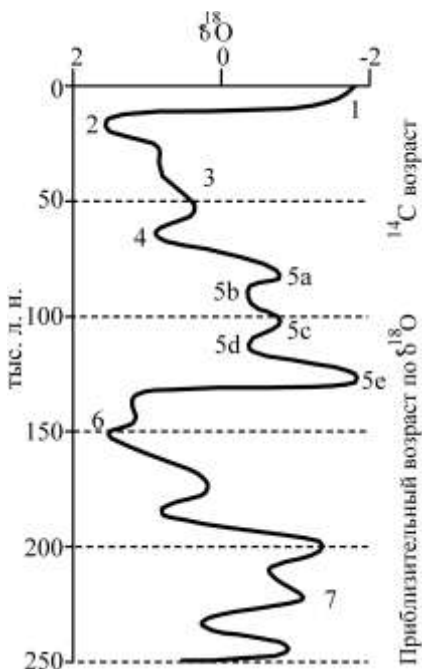


Рис. 1. Стандартная морская изотопно-кислородная шкала SPECMAP [1]; (цит. по [5])

несколько южнее 60° с. ш., в районе долины Демьянки, правого притока Иртыша [9]. Следовательно, вся северная часть Обь-Иртышского междуречья является областью самаровского среднелепесточного (максимального) оледенения.

Около 150—145 тыс. л. н. был кратковременный взлет АПЭ от минимального положения до максимального (см. рис. 1). Он завершился около 130 тыс. л. н. Ледники к тому времени на равнинах континентов полностью исчезли, а уровень Мирового океана поднялся от минимума порядка минус 200 м до +40 — +50 м (земская трансгрессия и ее аналоги). В Сибири в то время была теплая Арктика (казанцевская трансгрессия) с тепловодным комплексом морской фауны [10].

Период же позже 130 тыс. л. н. был, вероятно, ближе к концу потепления, чем к его началу, ведь во время МИС 5d-а АПЭ вновь резко сократился. Последующее время, охватившее конец МИС 5 и всю МИС 4, вырисовывается как состояние АПЭ, промежуточное от скудного до среднего. На кривой СПЕСМАР со времени МИС 5d до конца потепления МИС 3 климат отражается как промежуточный между максимально теплым (МИС 5e) до холодного (МИС 2). В климатическом отношении это время оценивается [5] как ледниковая эпоха позднего плейстоцена, которая охватывала МИС 5d-а, 4, 3 и 2. Такие построения нам представляются не совсем точными. МИС 5d-а и 4 действительно можно считать становлением новой, позднечетвертичной ледниковой эпохи. Важным этапом выделяется стадия МИС 3. АПЭ в то время приблизился к прохладному межледниковью. Нет оснований считать время от МИС 5 до конца МИС 3 единой ледниковой эпохой. Уровень Мирового океана был всего на 20—30 м ниже современного.

Для установления времени окончания относительного потепления МИС 3 большое значение имеют исследования с использованием радиоуглеродного метода в Западной Сибири. В низовьях долины Тобола близ пос. Липовка получены радиоуглеродные даты из древесины остатков погребенного елового леса, произраставшего всего на несколько метров выше современного меженного уровня Тобола. Даты, полученные в разных лабораториях, оказались близкими к 30 тыс. л. н. [11]. На основании этого в Западной Сибири выделено липовско-новоселовское потепление [12]. В дальнейшем они подтвердились новыми радиоуглеродными данными [13]. Даты свидетельствуют, что сток рек бассейна Оби на север в то время был свободным и ледниковой преграды еще не существовало. Это было окончание интерстадиала МИС 3.

Концом (завершением) позднечетвертичного глобального климатического макроцикла явилось последнее (сартанское) оледенение Западной Сибири. Оно было следствием сокращения АПЭ до минимума позже 30 тыс. л. н. Глетчер, южный край которого проходил по Сибирским Увалам, преградил сток на север Енисея и Оби. Возникла трансконтинентальная система озер (в Западной Сибири Енисейского и Мансийского). Тундра распространялась до южных пределов Западной Сибири.

В районе низовьев долины Енисея на основании изучения ледниковых, озерно-ледниковых и биогенных осадков (торфа) с широким радиоуглеродным датированием выяснена история возникновения и развития приледникового озера, образовавшегося во время последнего (сартанского) оледенения в Сибири [14, 15]. Исследованы Енисей-Обской спиллвей и связь Енисейского озера с Мансийским. На основе ана-

лиза аэро- и космоснимков и полевого наземного картирования изучен район пересечения образований краевой полосы гляциальной лопасти с Енисеем у пос. Лебедь (62° с. ш.) [14].

Современный уровень знаний по геологии квартера Западной Сибири, часть которого приведена выше, с учетом динамики энергетических факторов, новейших фактических данных, региональных исследований и данных глобального характера, а также учет результатов дистанционного зондирования местности позволяют авторам сообщения считать твердо установленными две особенности последнего оледенения этого региона.

1. Север Западно-Сибирской равнины вплоть до Сибирских Увалов включительно является областью континентального оледенения (сартанского) времени похолодания МИС 2. Западная Сибирь является одним из регионов последнего континентального оледенения, охватившего Северное и Южное полушария, вплоть до умеренных поясов [5].

2. Южнее границы глетчера располагалась трансконтинентальная система стока талых ледниковых вод, простиравшаяся от низовьев Лены до Каспия, Черного и Средиземного морей. Современная гидросеть является вторичной по отношению к этой системе стока, которая существовала не только во время поздненеоплейстоценового сартанского оледенения, но также и средненеоплейстоценового самаровского времени похолодания МИС 6, граница которого проходила в районе р. Демьянки, правого притока Иртыша.

Следствия резкого возрастания АПЭ к Земле многообразны. Весьма интересен в отношении характеристики дегляциации юго-восток Западной Сибири. Здесь получена определенная оценка перехода холодного и влажного климата к последующему теплomu и сухому в результате изучения и датирования осадков близ г. Искитима в Новосибирской области (рис. 2). Внизу стенки искусственной выработки прослежен четкий резкий переход от криогенной типично тундровой природной среды к началу накопления ельцовского покрова лесса, осевшего из атмосферы в теплом и сухом климате. Он произошел очень быстро, около 20 тыс. л. н. [16, 17]. Это было очередное начало потепления не только в Сибири, но и всей географической оболочки Земли. Смена природной среды, несомненно, явилось следствием глобального взлета АПЭ от минимального к максимальному, что ярко отразилось в дальнейшем на полученных энергетических кривых SPECMAP [1] и Индийского океана [2].

Во время последней дегляциации континентального оледенения в приледниковой зоне Западно-Сибирской равнины существовала трансконтинентальная система стока талых ледниковых вод [18]. Одним из компонентов этой системы было приледниковое Мансийское озеро,

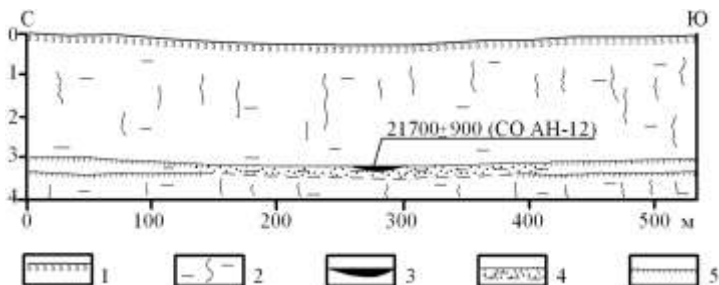


Рис. 2. Время начала образования ельцовского лесса в юго-восточной части Западной Сибири [17].

1 — современная почва; 2 — покров лессовых отложений; 3 — сильно гумусированная почва на дне ложины; 4 — супесь; 5 — гумусированная погребенная почва

уровень которого достигал максимальных высотных отметок +130 м (Тургайский спиллвей). Эта система существовала недолго и быстро разрушилась. Для этого времени было характерно преобладание ветров, дующих с запада, обладающих скоростями, значительно более высокими, чем современные. Эта активизация эоловых процессов протекала в условиях сухого климата, при котором сток рек атмосферного питания фактически прекращался. В Европейской части позже максимума хвалынской трансгрессии уровень Каспия в то время понизился на 100 м, от +50 до –50 м. В результате усыхания Хвалынского озера сток по нему в Черное море прекратился позже 13—12 тыс. л. н. [19]. Началась послехвалынская (мангышлакская) регрессия [20]. Увеличились площади засушливых регионов. Произошла всеобщая аридизация климата, названная *мангышлакской* [21].

Особенности геологических и географических процессов в Западной Сибири отражают общеглобальные особенности динамики природы во время последней дегляциации. Кроме стаивания на равнинах континентальных ледников в географической оболочке происходили и иные процессы, не менее существенные, чем оледенения. Эти процессы охватывали океан и атмосферу [22]. Климатические события в Западной Сибири, всей нашей страны и континентов отражают эти глобальные события. Стремительное возрастание АПЭ вызвало смену нисходящей части гляциоэвстатической регрессии восходящей. Уровень океана стал подниматься от его минимального состояния (~ около 130 м) [23] (рис. 3). Вода в жидкой и, в особенности, в твердой фазе айсбергов возвращалась в Мировой океан и вызывала неравномерное, но в целом быстрое его поднятие. Были КРЭ — интервалы катастрофических подъе-



Рис. 3. Изменения уровня Мирового океана и глобальные особенности динамики климата последней ледниковой стадии и послеледниковья (пояснения в тексте)

мов океанического уровня (CRE — catastrophic rise events) [15]. Одновременно поднималось и основание тропосферы, поэтому катастрофический подъем уровня океана правильно называть катастрофическим поднятием уровня океана и основания атмосферы. Были три таких события, связанных с известными резкими потеплениями позднеледниковья и голоцена: первое — с беллингом (12,2 тыс. л. н.), второе — с пребореалом (10 тыс. л. н.) и третье — с атлантическим периодом (7,2 тыс. л. н.). Среди относительных похолоданий климата, разделявших эти потепления, особенно глубоким было похолодание позднего дриаса (11—10 тыс. л. н.) [5, 15]. В среднем голоцене произошла фландрская трансгрессия Мирового океана на 2—3 м выше современного его уровня.

Важнейшим и до настоящего времени проблематичным вопросом палеогеографии Западной Сибири является время образования левобережных гляциальных гряд в низовьях Енисея (ньяпанской) и Оби (собкейской). Надежное определение времени их образования совершенно необходимо для окончательного решения всей проблемы позднего времени позднеледниковья. Пока не выяснен этот вопрос, нельзя считать и до конца решенной проблему трансконтинентальной системы стока та-

лых вод последнего континентального оледенения в Западной Сибири. Ньяпанская гляциальная левобережная гряда образовалась ранее прорыва Енисея на север. Спуск Енисейского и Мансийского озер вторичен по отношению к времени формирования этой гряды.

В голоцене началась эпоха педогенеза и господства биогенных процессов (формирование почв и болотообразование). В первой половине его в условиях теплого влажного климата, когда сток рек превышал современный в несколько раз, образовалась первая речная терраса, а позже пойма. Географическая оболочка приблизилась к современному состоянию.

Главный вывод заключается в следующем. Неправомерно рассматривать начало любого климатического мегацикла по окончанию дегляциации. Его началом была смена минимального АПЭ максимальным. МИС — это следствие максимума АПЭ. С учетом этого на протяжении единого климатического цикла географическая оболочка Земли изменялась трижды: а) период дегляциации — аридизация; б) завершение дегляциации и начало интерстадиала (или межледниковья) — педогенез, господство биогенных процессов и в) гляциация (минимум АПЭ) — криогенез. Такая последовательность была характерна и для более древних этапов быстрого изменения АПЭ от минимального к максимальному.

Формирование субаэральная формации континентов и характер отложения океанических илов сходны. И в лессовой толще, и в океанических илах отражена общепланетарная смена природной среды от максимально теплой (терминации) к умеренно теплой и холодной влажной. Каждый глобальный климатический макроцикл, таким образом, начинался одновременно на континентах и в Мировом океане резким потеплением с последующим переходом к похолоданию. В связи с этим слово «терминация» следует правильнее заменить на «начало».

Последний глобальный климатический макроцикл в Северном и Южном полушариях планеты начался около 20 тыс. л. н. во время дегляциации последнего континентального оледенения. Это выразилось на континентах началом накопления покрова лессовых образований (в Сибири ельцовского) в максимально теплых и сухих климатических условиях, в океанах — обогащением илов золовой пылью. Время от позднеледниковья к послеледниковью (начало голоцена) вырисовывается переходом от аридного к теплому влажному климату и в голоцене к эпохе педогенеза и господству биогенных процессов (на континентах).

Литература

1. *Jmbrie J., Hays J.D., Martinson D.G. et al.* The orbital theory of the marine $d^{18}O$ record // *Milankovitch and Climate*. P 1: NATO ASL Ser. C. V. 126. Dordrecht: D. Reidel, 1984. P. 269—305.
2. *Bassinet F.C., Labeyrie L.D., Vincent E. et al.* The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes-Matuyama magnetic reversal // *Earth Planetary Science Letters* 1994. V. 126. P. 91—108.
3. *Величко А.А.* Природный процесс в плейстоцене. М.: Наука, 1973. 256 с.
4. *Климат в эпохи крупных биосферных перестроек* / Гл. ред. М.А. Семихатов, Н.М. Чумаков. М.: Наука, 2004. 299 с. (Тр. ГИН РАН. Вып. 550).
5. *Борисова О.К.* Ландшафтно-климатические изменения в умеренных широтах Северного и Южного полушарий за последние 130 000 лет. М.: Геос, 2008. 247 с.
6. *Кульшова И.А., Волкова В.С.* Ландшафты и климаты Западной Сибири в палеогене и неогене // *Геология и геофизика*. 1997. Т. 38, № 3. С. 581—595.
7. *Волков И.А., Казьмин С.П.* Палеоценовая кора выветривания как важнейший хронологический репер в геологии Западной Сибири // *Вестн. ВГУ. Сер. геол.* 2007. № 2. С. 221—223.
8. *Volkov I.A., Volkova V.S.* Geological information from subaerial sequence as the basic direction in further study of Pleistocene // *Loess and paleoenvironment*, Moscow, May 26 — June 1, 2003. Moscow: Publishing House «GEOS» (in English), 2003. P. 62—63.
9. *Условия и время формирования надпойменных террас р. Демьянки (центр Западной Сибири)* / С.В. Лещинский, А.В. Ахтерьякова, Д.Е. Лунева, А.С. Резвый, Н.Д. Бурова // *Фундаментальные проблемы квартера: итоги изучения и основные направления дальнейших исследований: Матер. VI Всерос. совещ. по изучению четвертичного периода*, г. Новосибирск, 19—23 октября 2009 г. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. С. 362—365.
10. *Троицкий С.Л.* Новые данные о последнем покровном оледенении Сибири // *Докл. АН СССР. Сер. геол.* 1967. Т. 174, № 6. С. 1409—1412.
11. *Волков И.А.* Палеогеографическое значение некоторых радиоуглеродных датировок на юге Западной Сибири // *Геология и геофизика*. 1973. № 2. С. 3—8.
12. *Кинд Н.В.* Геохронология позднего антропогена по изотопным данным // *Тр. ГИН. Вып. 257*. М.: Наука, 1974. 255 с.
13. *Кривоногов С.К.* Пневые горизонты в позднеплейстоценовых отложениях Сибири // *Новости палеонтологии и стратиграфии. Приложение к журналу «Геология и геофизика»*. 2001. Вып. 4. С. 143—152.
14. *Гончаров С.В.* Последнее оледенение Западной Сибири и ледниково-подпрудные озера в бассейне Среднего Енисея: Автореф. дис... канд. геогр. наук. М.: Институт географии, 1989. 25 с.
15. *Гросвальд М.Г.* Евразийские гидросистемные катастрофы и оледенение Арктики. М.: Научный мир, 1999. 118 с.
16. *Волков И.А.* Позднечетвертичная субэральная формация. М.: Наука, 1971. 254 с.

17. Волков И.А. Позднезырянский (сартанский) покров лессов, лессовидных суглинков и эоловых песков // Палеогеография Западно-Сибирской равнины в максимум позднезырянского оледенения / С.А. Архипов, В.А. Астахов, И.А. Волков и др. Новосибирск: Наука, 1980. С. 66—73.
18. Волков И.А., Казьмин С.П. Сток вод последнего оледенения Севера Евразии // География и природные ресурсы. 2007. № 4. С. 5—10.
19. Чепалыга А.Л. Эпоха экстремальных затоплений в аридной зоне Северной Евразии // Позднекайнозойская геологическая история севера аридной зоны. Ростов н/Д; Азов, 2006. С. 166—171.
20. Шкатова В.К. Региональная стратиграфическая схема квартера Нижне-волжского (Каспийского) региона // Там же. С. 175—180.
21. Казьмин С.П. Мангышлакская аридизация последней дегляциации в умеренном поясе Северного полушария // Фундаментальные проблемы квартера: итоги изучения и основные направления дальнейших исследований: Матер. V Всерос. совещ. по изучению четвертичного периода. Москва, 7—9 ноября 2007 г. М.: ГЕОС, 2007. С. 163—165.
22. Казьмин С.П., Волков И.А., Климов О.В. Последняя дегляциация, океан и атмосфера // Там же. С. 165—168.
23. Fairbanks R.G. 17,000 years glacio-eustatic sea level record; influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep ocean circulation // Nature. 1989. V. 342. P. 637—642.

РЕЖИМ СИЛЬНЫХ ВЕТРОВ И РИСКИ УЩЕРБА ОТ ИХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ЮГО-ВОСТОКА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

И.О. Лучицкая, Н.И. Белая

*ГУ «Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт», г. Новосибирск*

Введение

Вопросы оценки и использования климатических ресурсов страны для проведения экономической политики и обеспечения безопасной жизнедеятельности входят в число приоритетных задач гидрометеорологии, являются предметом исследований и моделирования показателей влияния погодно-климатических условий на отрасли экономики [1—3]. В рамках этой проблемы особое значение приобретают специализированные исследования режима опасных явлений (ОЯ) погоды с учетом региональных особенностей и создаваемых ими рисков ущерба. Кроме того, в свете известных изменений климата принятие оптимальных климатически обусловленных решений в производственной деятельности и социальной сфере должно базироваться на данных, учитывающих эти тенденции и их последствия.

Для оценки погодно-климатических рисков, управления ими и обеспечения деятельности адаптации необходимо располагать информационными ресурсами, которые содержат, с одной стороны, научно-обоснованные данные о режиме ОЯ (вероятность возникновения, продолжительность действия, площадь охвата), а с другой — адекватные сведения о непредотвращенных потерях от их воздействия, что соответствует понятию уязвимости объекта. Между тем второе звено информационной «цепочки» в настоящее время не отвечает в полной мере требованиям полноты и качества. Инициатива Росгидромета по созданию унифицированной базы данных о негативных последствиях от воздействия неблагоприятных и опасных гидрометеорологических явлений в рамках Проекта «Модернизация и техническое перевооружение...» и исследования в этой области [4] направлены на обеспечение мониторинга информационных ресурсов и их интеграцию.

Следует отметить, что в практике климатологии всегда активно развивались косвенные методы расчетов различного рода климатических характеристик, ориентированных на прикладные задачи с исполь-

зованием статистических законов и интерпретации моделей метеорологических процессов [5, 6]. К настоящему времени получили развитие исследования по анализу рисков различных направлений жизнедеятельности с применением целого ряда подходов и методов, среди них — вероятностный, эвристический, метод нечетких множеств, теория неопределенностей. Применительно к погодно-климатическим рискам ущерба (в стоимостном выражении) предлагается эмпирический метод, базирующийся на экономико-климатической модели оценок социальных и экономических потерь, создаваемых опасными природными явлениями. Метод описан в [7] и апробирован в отношении ряда опасных явлений погоды для отдельных регионов РФ [8, 9]. В работе принимается определение риска как функции двух переменных — частоты и последствий нежелательного события.

Суть метода состоит в том, что из двух основных компонент риска — вероятности явления и уязвимости объекта, вторая определяется косвенно — на основе оценки уязвимости рассматриваемой территории, которая определяется возможным количеством людей, попадающих в зону поражения опасным явлением, и выражается в денежном эквиваленте — ВВП на душу населения РФ. Такого рода природные риски называют предметно ориентированными, их расчет применим для конкретных территорий (область, муниципальное образование, объект), располагающих статистическими сведениями о демографии и площади территорий. Данный методологический подход применялся ранее при разработке индекса потерь с целью анализа потенциальной опасности для регионов (на страноведческом уровне) в отношении природных явлений (землетрясение, наводнение) и техногенных катастроф [10].

Эмпирический метод оценки рисков, создаваемых опасными явлениями, как указывают авторы [11], нуждается в дальнейшем развитии и усовершенствовании, поскольку на данном этапе реализует модель с целым рядом допущений. Так, предполагается равная вероятность явления в любой точке территории, что применимо лишь к локальным явлениям редкой повторяемости (град, смерч), но не отвечает природе явлений с выраженным пространственным распределением (ветер, метели). Упрощение также относится к характеристике уязвимости, не учитывая плотность населения и полагая равномерное распределение людей по территории.

Сильные ветры относятся к числу агрессивных природных явлений, и спектр их негативного воздействия достаточно широк. Это динамические нагрузки на сооружения, осложнение работы транспортных средств, пагубное влияние на сельское хозяйство, в горных районах —

перераспределение снега, способствующее усилению лавинной опасности; отрицательный биоклиматический фактор. Оценка влияния на экономику России, характер последствий на различные отрасли ветров разрушительной силы (сильные ветры, ураганы, шквалы, смерчи) за 10-летие (1991—2000 гг.) даны в работе [12]. Выявлена тенденция роста числа «ветровых» ОЯ.

По данным [13], где исследовалось пространственное распределение повторяемости опасных явлений на равнинной территории РФ за период 1986—2005 гг., азиатский регион России чаще подвергается ветрам опасной силы (25 м/с и более), чем европейская часть. Именно в Алтайском крае располагается очаг повторяемости сильных ветров; здесь их отмечается 12 случаев в году, что на порядок больше, нежели в Кировской или Ростовской областях. В Сибири доля сильных ветров в общей совокупности опасных метеорологических явлений является преобладающей.

В перечне наблюдавшихся в 2005—2007 гг. на юго-востоке Западной Сибири сильных ветров (по данным донесений об ОЯ с метеорологических станций ЗапСибУГМС) особое место занимает дата 2—3 мая 2007 г., когда опасное явление охватило 40 % территории Новосибирской области (14 станций). Наибольшая продолжительность сильного ветра 24 ч 50 мин (более суток) отмечалась в районе ст. Чаны. В результате стихии выведены из строя 24 опоры ЛЭП и повреждены 19 домов; ущерб оценен в 4 млн руб. Общий экономический ущерб по Новосибирской области составил около 18 млн руб. Значительные потери понесли южные районы области — Карасукский, где возникли пожары (2,5 млн руб.), и Баганский (1,6 млн руб.).

В случае возникновения опасного явления наиболее чувствительными оказываются экономически развитые территории. Так, 17 июня 2007 г. в Томске и его пригороде шквал нанес ущерб в размере 48 млн руб. (обошлось без жертв).

В данной статье ставилась цель исследовать региональные особенности режима сильных ветров на территории юго-востока Западной Сибири, рассчитать риски и показать эффективность пространственной их детализации, выполнить сравнительную оценку с фактическим ущербом.

Привлечены данные скорости ветра 25 м/с и более (включая порывы) по 124 станциям 5 субъектов РФ — Томская, Новосибирская, Кемеровская, Алтайский край и Республика Алтай за период 1985—2009 гг. Используются критерии ОЯ Руководящего документа РД от 2002 г. [14]. Следует отметить, что с 2009 г. вступил в силу РД [15], где изменены критерии некоторых опасных явлений погоды, в том числе и очень сильного ветра.

Метод расчета рисков

Социальный риск рассчитывается по формуле

$$R_{\text{соц}} = p \frac{S}{S} \tau L K, \quad (1)$$

где p — вероятность лет с явлением; s — средняя площадь, подверженная ОЯ; S — общая площадь территории; τ — продолжительность действия явления (дни); L — численность населения; K — коэффициент агрессивности ОЯ.

В случае расчета уязвимости и риска для любого объекта (реципиента) в пределах административной единицы оценка риска производится путем введения в формулу (1) множителя, представляющего собой отношение площади объекта ($s_{\text{об}}$) к общей площади территории. Формула социального риска принимает вид

$$R_{\text{соц}}^{\text{об}} = p \frac{S}{S} \frac{s_{\text{об}}}{S} \tau L K. \quad (2)$$

Экономический риск в случае одного явления определяется с помощью выражения

$$R_{\text{эк}} = R_{\text{соц}} A(\tau), \quad (3)$$

для максимального или среднего числа явлений —

$$R_{\text{эк}} = R_{\text{соц}} A(\tau) M_{\text{макс (ср)}}. \quad (4)$$

Здесь $A(\tau)$ — цена риска, равная сумме долей ВВП и основного фонда на душу населения; $M_{\text{макс (ср)}}$ — максимальное (среднее) число случаев, на которых отмечено опасное явление.

В формуле (1) вероятность риска представлена величиной

$$P_R = p \frac{S}{S}. \quad (5)$$

С помощью классификации рисков [7] определяется принадлежность рассчитанного параметра к одной из трех категорий: допустимый риск, недопустимый (чрезмерный) и приемлемый (промежуточный). В России принята допустимая вероятность социального риска (в год) не менее порядка 10^{-5} .

Режимные характеристики сильных ветров и пространственное их распределение

Распределение повторяемости сильных ветров отражает характерные особенности физико-географических условий юго-востока Западной Сибири [16]. На рис. 1 представлено фоновое распределение фактического годового максимума числа дней с ветром 25 м/с и более. Отметим, что на территории Горного Алтая изолинии не проводились.

В Томской области северо-восточные районы таежной зоны, занимающие около 20 % региона, «не знают» сильных ветров; скорость ветра 25 м/с и выше не наблюдается. На остальной территории области максимальная повторяемость сильного ветра находится в пределах 1—3 дней. Ослабление ветра в этой зоне Западной Сибири происходит под

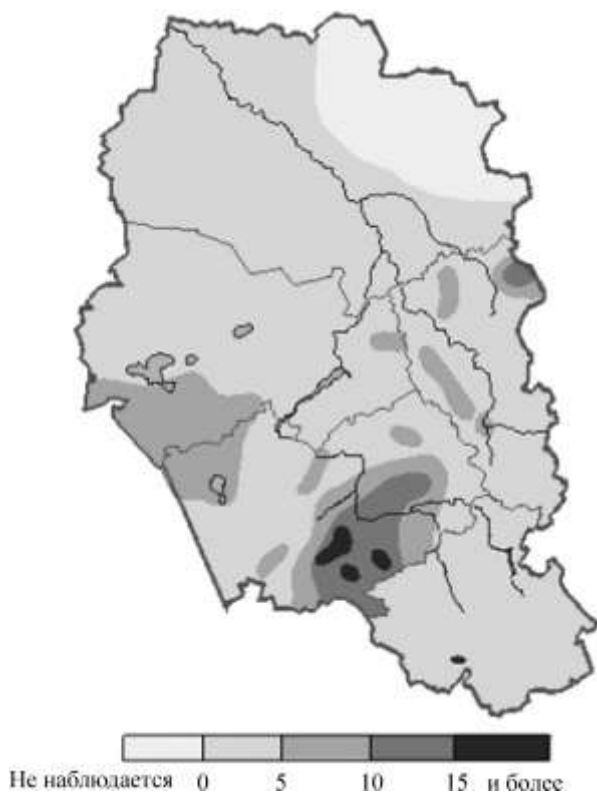


Рис. 1. Максимальное число дней в году с ветром 25 м/с и более

влиянием значительной шероховатости подстилающей поверхности, которую создает лесная растительность. Районы Барабинской и Кулундинской степей относятся к ареалам повышенной ветроопасности, здесь экстремумы частоты ОЯ колеблются в пределах от 5 до 8 дней (Кочки, Купино, Карасук). Характерно, что в г. Новосибирске по данным станций Учебная и Огурцово за исследуемый период наблюдений (25 лет) не отмечено ни одного случая ОЯ. Экранирующие склоны Салаирского кряжа и Кузнецкого Алатау являются контрастными ($n_{\text{макс}} = 5\text{—}7$ дней) по отношению к районам «ветровой тени» ($n_{\text{макс}} = 1\text{—}2$ дня). И, наконец, в предгорьях Алтая в продуваемых долинах, открытых к равнине, отмечается повторяемость сильных ветров, достигающая максимальной величины 20—30 дней в году (Солонешное, Чарышское). Особое место в распределении сильных ветров занимают горы Алтая. «Эксклюзивным» районом является вершина каменистого плато северного отрога Катунского хребта на высоте 2600 м (ст. Кара-Тюрек), где в 2004 г. сильные ветры отмечались в общей сложности около двух месяцев (58 дней). Глубокие замкнутые долины Горного Алтая практически не подвержены сильным ветрам, максимум годовой повторяемости не превышает 1—2 дней.

В среднем многолетнем разрезе на территории Томской области сильные ветры наблюдаются один раз в 10 лет, в Новосибирской области — раз в 2 года, в Кемеровской области — в семи годах из 10 и в Алтайском крае — ежегодно (примерно 2 дня в году). В Кара-Тюреке в среднем за год отмечается 16 дней с $V \geq 25$ м/с.

Оценки рисков от воздействия ОЯ основаны на некоторых нетрадиционных способах обработки информации, поэтому следует остановиться более подробно на характеристике каждого параметра (формулы (1)—(4)), методах их расчета и пространственном распределении по территории.

Вероятность лет с явлением (p) определяется по данным станций, но с оценкой для всей территории рассматриваемого субъекта:

$$p = \frac{N'}{N}, \quad (6)$$

где N' — число лет с явлением; N — общее число лет наблюдений.

Вероятность числа лет с ОЯ — это вероятность того, что в год будет наблюдаться хотя бы одно явление. При последующем расчете риска привлекается число случаев (число станций с ОЯ) — среднее ($M_{\text{ср}}$) либо максимальное ($M_{\text{макс}}$).

В Томской области сильные ветры наблюдаются в 60 % лет, и опасное явление охватывает наименьшее количество станций. В двух субъектах — Алтайском крае и Республике Алтай, имеется 100%-я вероятность ежегодного возникновения сильного ветра, разница заключается лишь в количестве случаев с ОЯ. Заметно, что годы отсутствия сильных ветров приходятся в основном на период текущего столетия (табл. 1). Как будет показано ниже, этот факт является отражением тенденции уменьшения их повторяемости на исследуемой территории.

Площадь, подверженная сильному ветру (s). Для определения средних по площади значений климатических параметров используются различные методы пространственного обобщения: метод квадратов, треугольников, полигонов [17]. Современные возможности обработки и графической визуализации двумерных наборов данных позволяют строить непрерывные поверхности на основе различных интерполяционных функций, оценивая площади полигонов (Surfer, Map info). В этих случаях, однако, требуется контроль специалиста в части корректности результатов интерполяции. В работе [7] рекомендуется использовать значение средней площади, подверженной ОЯ. Однако, исходя из задачи сравнения расчетных рисков с фактическими потерями по данным «Донесения...» со станций, необходимо оперировать величиной площади, отнесенной также к одной станции. Приближенное значение определено как отношение площади территории субъекта к числу пунктов наблюдения. Данный подход, хотя и является достаточно формальным, однако может обеспечить приемлемую точность характеристики риска, принимая во внимание оснащенность региона сетью станций. Согласно результатам расчета минимально необходимого количества пунктов метеорологических наблюдений с учетом неоднородности рельефа и хозяйственного освоения [18], территория деятельности Западно-Сибирского УГМС «укомплектована» сетью станций на 81 % (необходимое

Т а б л и ц а 1

Вероятность лет с сильным ветром (p) за период 1985—2009 гг.

Субъект РФ	Число лет с ОЯ	p	Годы отсутствия ОЯ
Томская область	15	0,60	1990, 1991, 1996—1998 2000, 2005, 2007—2009
Новосибирская область	21	0,84	2003, 2005, 2006, 2008
Кемеровская область	22	0,88	2003, 2005, 2008
Алтайский край	25	1,00	—
Республика Алтай*	25	1,00	—

* ст. Кара-Тюрек не включена.

Т а б л и ц а 2

**Средняя площадь (s , км²) охвата территории сильным ветром,
отнесенная к одной станции**

Субъект РФ	Число станций, M	S , км ²	$s = S/M$
Новосибирская область	35	178 200	5136
Кемеровская область	21	95 500	4548
Алтайский край	32	167 850	5243

число станций — 154, фактическое — 125). При этом практически полностью соответствует оптимальному уровню Кемеровская и Новосибирская области (95—100 %), в меньшей степени — Алтайский край (75 %), Томская область (72 %), Республика Алтай (65 %). Исходя из этих данных, по сети станций Новосибирской, Кемеровской областей и Алтайского края показатели средней площади экстремального ветрового режима составляют в среднем 5000 км² (табл. 2).

Одновременный охват территории сильным ветром. Представляет интерес рассмотреть режим одновременного охвата территории сильными ветрами, т.е. когда ОЯ в конкретную дату фиксируется на одной и более станциях. На исследуемой территории отмечается значительное варьирование размера одновременно занимаемой площади (табл. 3). Видно, что в первых трех субъектах доля случаев сильного ветра на одной станции колеблется в пределах 60—90 %, а максимальный охват включает 10—17 станций (в Томской области — вдвое меньше). Для ветрового «эпицентра» — Алтайского края, напротив, характерны более

Т а б л и ц а 3

Распределение одновременного охвата станций сильным ветром, %

Субъект РФ	m	Число станций					Наибольший охват, %
		1	2—4	5—7	8—10	>10	
Томская область	37	86,5	8,1	5,4	—	—	22
Новосибирская область	138	58,8	27,5	5,8	3,6	4,3	49
Кемеровская область	182	64,9	26,4	7,1	1,6	—	43
Алтайский край	50	22,0	22,0	16,0	12,0	30,0	94
Республика Алтай	45	44,4	31,1	15,6	8,9	—	33

П р и м е ч а н и е. m — количество групп станций с различным охватом.

крупные масштабы площадей, а повторяемость случаев наблюдения ОЯ на одной станции сокращается до 22 %; максимум 22 апреля 1985 г. (93 %) соответствует практически полному «покрытию» территории края.

На рис. 2 иллюстрируется несколько случаев значительного охвата (более 20 %) сильным ветром территории юго-востока Западной Сибири. Специфика формирования ареалов состоит в том, что все они в основном имеют форму направленных с юго-запада на северо-восток «языков», захватывая чаще всего Алтайский край, с различной степенью вероятности Новосибирскую и Кемеровскую области, и заметно реже проникают на территорию Томской области. Такие периоды могут длиться 2 дня подряд, меняя конфигурацию, но сохраняя критическую величину площади. В Горном Алтае сильным ветрам подвержены только открытые высокогорья (Кара-Тюрек, Ак-Кем).

Продолжительность действия сильного ветра (τ , дни). Продолжительность сильного ветра в наиболее ветроопасном регионе — Алтайском крае, составляет в среднем 5 ч. Отмечаются и более длительные периоды сильных ветров, но они сохраняются менее суток. Так, максимальная продолжительность ветра 25 м/с и более составила в Благовещенке 21 ч. Вместе с тем встречаются случаи, когда ветер 25 м/с и более (в порывах) фиксируется два и более дней подряд. В Алтайском крае, например, наибольшая продолжительность такого рода «непрерывного» периода составила 4 дня, на ст. Кара-Тюрек — неделю. Очевидно, что это обстоятельство приводит к ужесточению погодных условий и должно учитываться при расчете рисков. Таким образом, в нашем исследовании сильный ветер, наблюдавшийся в двух и более смежных датах, считался случаем с ОЯ соответствующей длительности в днях. Расчеты показали, что длительность периодов (τ) колеблется в пределах 1,0—1,2 дней.

Параметр $A(\tau)$ — показатель цены риска, равный сумме долей ВВП и основного фонда, приходящиеся на одного человека. При этом доля основного фонда принимается равной доле ВВП Российской Федерации (в 2007 г. составлял 177,2 тыс. руб.).

Как показано в работе [7, 9], для оценок в отношении особенно разрушительных и опасных для жизни человека явлений (смерч, шквал, град) используется годовая величина $A(\tau)$, а применительно к сильному ветру рекомендовано оценивать риск исходя из ВВП (и основного фонда) на душу населения за время действия ОЯ (τ , дни). Так, цена риска при $\tau = 1,1$ дня равна: $(177,2 \text{ тыс. руб.}/365) \cdot 1,1 = 534 \text{ руб.}$

Коэффициент агрессивности (К). Параметр, разработанный в ГГО в процессе создания методологии оценки уязвимости и рисков, пози-



Рис. 2. Охват территории юго-востока Западной Сибири сильным ветром характеризует силу давления ОЯ на подстилающую поверхность. Напор ветра 25 м/с, составляющий 38 кг/м^2 , приравнивается к единице, и от него рассчитываются коэффициенты (K) для других явлений. В шкале агрессивности опасных метеорологических явлений коэффициент K для сильного ветра равен 1, крайние значения: для смерча — $K = 6,2$; для осадков — $K = 0,0025$ [7, 9].

Оценка социального и экономического рисков

В табл. 4 представлены результаты расчета социального и экономического рисков, создаваемых скоростью ветра 25 м/с и более. Видно, что для Кемеровской области свойственна наибольшая социальная уязвимость, и объясняется она высоким уровнем экономического потенциала региона и значительной плотностью населения. Ежегодно в зону опасного ветра попадает 129 тыс. человек, экономический риск составляет около 70 млн руб. Вдвое меньше потенциальные потери в Новосибирской области и Алтайском крае. Минимальный риск от сильных ветров имеет место в долинах Горного Алтая — менее 1 млн руб. в год. Судя по данным параметра P_R , вероятность риска повсеместно чрезмерная, на три порядка превышает допустимую.

Таблица 4
Расчет социального и экономического рисков от воздействия
сильного ветра (один случай)

Субъект РФ	S , тыс. км^2	L , тыс. чел.	P	s/S	τ , дни	$R_{\text{соц}}$, тыс. чел.	$R_{\text{эк}}$, млн руб.	P_R
Томская область	316,9	1038,5	0,60	0,016	1,1	10,0	5,3	$9,6 \cdot 10^{-3}$
Новосибирская область	178,2	2639,9	0,84	0,028	1,2	62,1	36,2	$2,3 \cdot 10^{-2}$
Кемеровская область	95,5	2821,9	0,88	0,052	1,1	129,1	69,0	$4,6 \cdot 10^{-2}$
Алтайский край	169,1	2496,8	1,00	0,030	1,2	74,9	43,6	$3,0 \cdot 10^{-2}$
Республика Алтай*	92,6	200,0	0,84	0,054	1,0	0,91	0,44	$4,4 \cdot 10^{-2}$

Примечание. * — кроме высокогорных станций Кара-Тюрек, Ак-Кем, Кош-Агач; $s = 5000 \text{ км}^2$.

Таблица 5

**Риск от воздействия сильного ветра при одновременном охвате территории
25 % и более**

Субъект РФ	N'	p	s/S	τ	$R_{\text{соц}}$ тыс. чел.	$R_{\text{эк}}$ млн руб.	P_R
Томская область*	1	0,04	0,22*	1,0	9,1	4,4	$8,8 \cdot 10^{-3}$
Новосибирская область	6	0,24	0,42	1,3	266,1	167,9	$10,1 \cdot 10^{-2}$
Кемеровская область	7	0,28	0,30	1,1	237,0	126,4	$8,4 \cdot 10^{-2}$
Алтайский край	11	0,44	0,43	1,4	472,4	321,0	$15,9 \cdot 10^{-2}$

* Взята наибольшая площадь — 22 %.

Наиболее неблагоприятные погодные условия создаются в периоды ветровых вторжений, охватывающих значительные территории. Нами в качестве критической величины одновременного охвата взята площадь 25 % и более (по числу станций) на территории каждого субъекта (табл. 5). На преобладающей территории частота больших площадей, подверженных опасному ветру, явление не редкое. Так, в Кемеровской области и Алтайском крае такой характер погоды создается каждый второй-третий годы, а расчетная величина риска исчисляется сотнями миллионов рублей. Оценки потенциального риска ущерба, создаваемого экстремальными условиями ветрового режима, могут быть использованы для перспективного планирования адаптационных и защитных мероприятий.

Пространственная детализация уязвимости и рисков на территории Новосибирской области

При исследовании особенностей поведения больших площадей, подверженных действию сильных ветров, обращено внимание, что условия равной вероятности уязвимости объекта, расположенного в любой точке территории, не выполняются применительно к данному явлению. К примеру, распространение площади охвата в Новосибирской области повторяет модель для всей территории юго-востока Западной Сибири, здесь наиболее уязвимыми оказываются юго-западные районы; сильные ветры на север территории распространяются заметно реже. Отсюда следует необходимость детализированной оценки уязвимости территории и создаваемых сильным ветром рисков. В Новосибирской области выделено три района и определены параметры рисков — вероятность и уязвимость (табл. 6, рис. 3). Первый район охватывает в основном лесную зону области. Согласно данным табл. 6, здесь отмечено четыре года с явлением, так как в 1985 и 2007 гг. сильный ветер не на-

блюдался. В третий район выделена юго-западная, степная часть области. Второй, наибольший по площади район по режиму сильных ветров занимает промежуточное положение.

Таблица 6

**Одновременный «охват» сильным ветром 25 % и более станций
на территории Новосибирской области**

Станция	Годы с опасным явлением, N'							
	22.04. 1985	17.04. 1988	18.04. 1988	09.04. 1989	16.03. 1990	17.03. 1990	24.12. 1995	02.05 2007
1	2	3	4	5	6	7	8	9

1-й район

Кыштовка		+	+				+	
Северное		+					+	
Крещенка		+						
Болотное						+		
Мошково				+				
$M'(1)$		3	0*	1	0	1*	2	

2-й район

Венгерово		+	+				+	+
Усть-Тарка		+	+				+	+
Колывань				+	+	+		+
Убинское		+			+	+	+	+
Барабинск		+			+	+	+	
Чаны								
Тогучин		+	+	+	+	+		+
Каргат					+	+	+	+
Татарск		+	+					
Огурцово								
Чулым				+	+	+		
Коченево								
Учебная								
Обская ГМО				+		+		
Искитим	+		+		+			
Ужаниха								
О-в Дальний		+	+			+		+
Ордынское	+			+			+	
Маслянино	+			+				

Посевная	+		+	+				
Сузун	+		+		+			
<i>M'(2)</i>	5	7	3*	7	8	2*	6	7

Окончание табл. 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
3-й район								
Квашнино				+	+		+	+
Здвинск		+	+	+	+	+	+	+
Чистоозерное		+	+		+	+	+	+
Довольное		+	+	+	+		+	+
Купино	+	+	+		+	+	+	
Кочки		+	+		+	+	+	
Баган	+		+		+	+	+	
Краснозерск	+						+	
Карасук	+	+	+	+	+		+	+
<i>M(3)</i>	4	6	1*	4	8	0	9	5
Сумма	9	16	4*	12	16	3*	17	12
Сумма (общая)	9	20		12	19		17	12
Доля, %	25,7	57,1		34,3	54,3		48,6	34,3

* Недостающие случаи второго дня.



Рис. 3. Районы с различной вероятностью риска (s_i/S_p) территории Новосибирской области от воздействия сильного ветра.

1-й район — 0,23; 2-й район — 0,37; 3-й район — 0,68

Таблица 7

Эффективность детализации экономического риска от воздействия сильного ветра в Новосибирской области (НСО)

Район	p_i	s_i/S_p	S_p/S	$R_{эк}$ млн руб.			P_R
				A	B	Δ	
1	0,16	0,23	0,14	8	23	-15	0,037
2	0,24	0,37	0,60	89	101	-12	0,089
3	0,24	0,68	0,26	71	44	27	0,144

Характеристики для территории Новосибирской области

НСО	0,24	0,42	1,00	168	168	0	0,101
-----	------	------	------	-----	-----	---	-------

Расчеты экономического риска выполнялись по формуле

$$R_{эк(i)} = p_i \cdot (s_i/S_r) \cdot (S_r/S) \cdot L \cdot A(\tau), \quad (7)$$

где p_i — вероятность сильного ветра в i -м районе; s_i — площадь, занимаемая ОЯ (число станций с явлением); S_r — площадь района (число

станций в районе); S — площадь территории области (количество станций $M = 35$).

Проведена оценка эффективности детализации параметров — составляющих экономического риска (табл. 7, рис. 4). Результаты показывают, что в первом районе при учете слабых ветровых условий риски значительно меньшие, нежели рассчитанные по средним значениям для области, т. е. когда учитывается лишь доля площади района от общей площади НСО, и разность составляет 15 млн руб. Противоположный результат имеет место в третьем районе, где вследствие большой повторяемости сильных ветров риск выше среднего варианта оценок на 27 млн руб. Второй район, как и первый, в меньшей степени ветроопасен, об этом говорят расчетные характеристики с учетом детализации рисков, но погрешность различий невелика, порядка 12 %.

Проведенные расчеты свидетельствуют о возможности применения распределительных мер по адаптации в пользу наиболее проблемного юго-западного района Новосибирской области при разработке мер по снижению негативных последствий от воздействия сильного ветра для территории субъекта. Безусловно, принцип расчета площади, подверженной сильному ветру, на основе соотношений числа станций с ОЯ к общему их количеству вносит определенные погрешности в оценки детализации, избежать их возможно путем оценок площадей более корректными методическими приемами. Однако, в целом, основной вывод сводится к тому, что при расчете риска для реципиента необходим учет не только его площади, но и вероятности уязвимости.

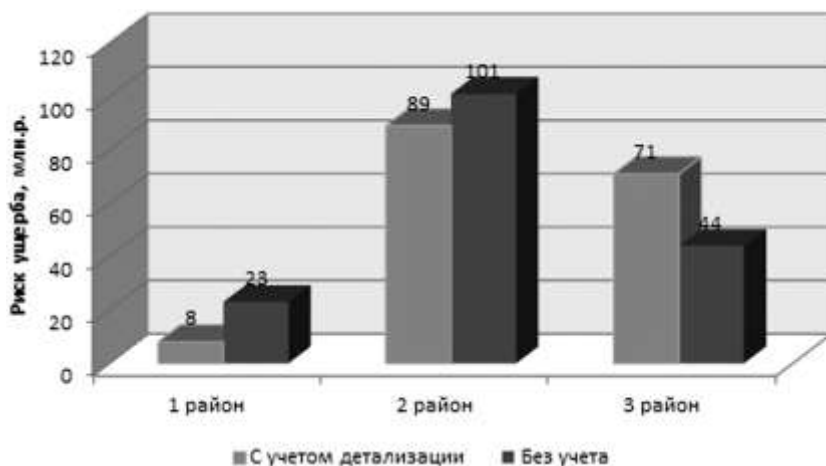


Рис. 4. Риск ущерба (млн руб.) для районов с разной степенью уязвимости к воздействию сильных ветров

Многолетние изменения в режиме сильных скоростей ветра

Исследования многолетних изменений ветрового режима рассмотрены в [12, 19—22], при этом преобладают результаты, свидетельствующие о снижении энергетики ветра на больших пространствах территории России, что нашло отражение в показателях средних значений и экстремальных скоростей. Исключение составляет работа [12], где представлены противоположные выводы. В результате специальных оценок выявлено, что расхождения вызваны использованием различных исходных данных по сильному ветру: отрицательный тренд дают данные метеорологических ежемесячников, а рост ОЯ отмечается по базе данных о стихийных гидрометеорологических явлениях (СГЯ). Среди возможных причин ослабления скорости ветра первостепенное значение придается увеличению защищенности метеорологических площадок, а также методическим факторам, связанным с измерениями ветра различными приборами. Что касается исследований зависимости уменьшения скорости ветра на территории России с характеристиками общей циркуляции атмосферы, проявляющейся в виде ослабления градиентов в поле приземного давления [21], то они не дали сколько-нибудь обоснованных результатов.

Нами рассмотрена динамика изменения режима сильного ветра — числа случаев с явлением и площади охвата территории в исследуемых субъектах РФ. Результаты тренд-анализа показали, что частота сильного ветра и масштаб площади распространения ОЯ имеют четко выраженный и значимый отрицательный тренд (рис. 5, 6). Параллельно представлена картина многолетней динамики частоты сильного ветра (25 м/с и более) в Кара-Тюреке ($H = 2600$ м) и проведено сравнение с тенденцией приземного ветра за этот же период на других станциях (рис. 7). Как видно, сокращение повторяемости сильных ветров не подтверждается трендом на больших высотах, соответствующих примерно изобарической поверхности 700 гПа.

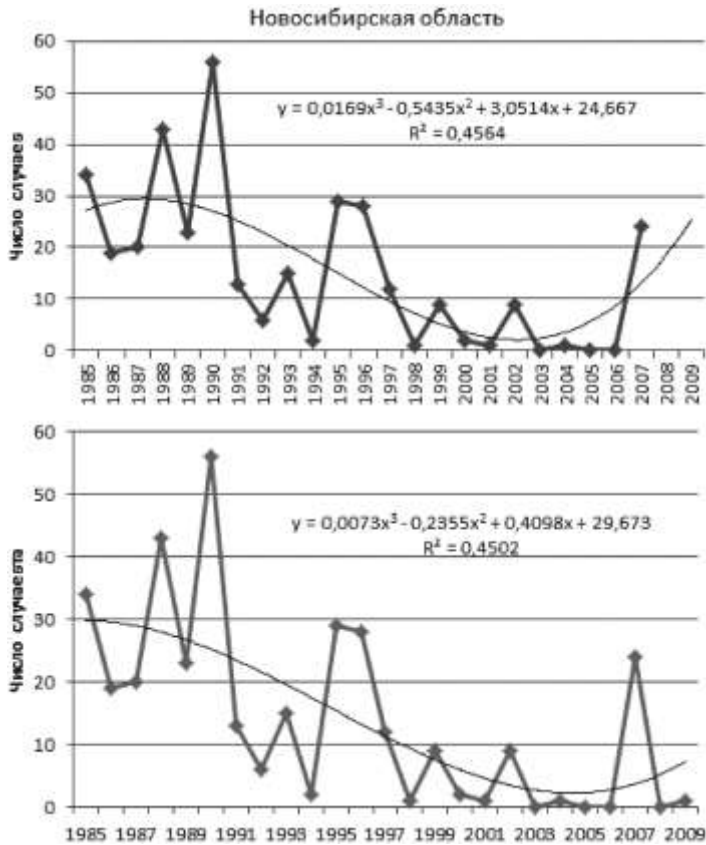


Рис. 5. Кубический тренд изменения годового числа случаев с сильным ветром.

Вверху — за период 1985 — 2007 гг. с прогнозом до 2009 г.; внизу — за период 1985—2009 гг.

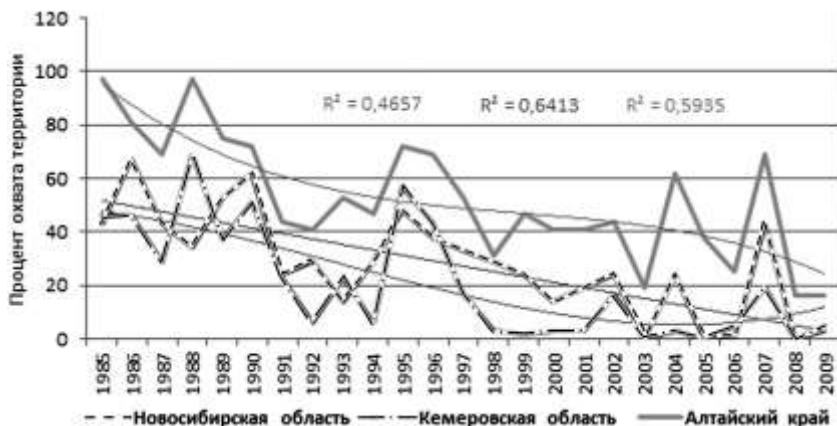


Рис. 6. Многолетние изменения площади охвата территорий сильным ветром (кубический тренд)

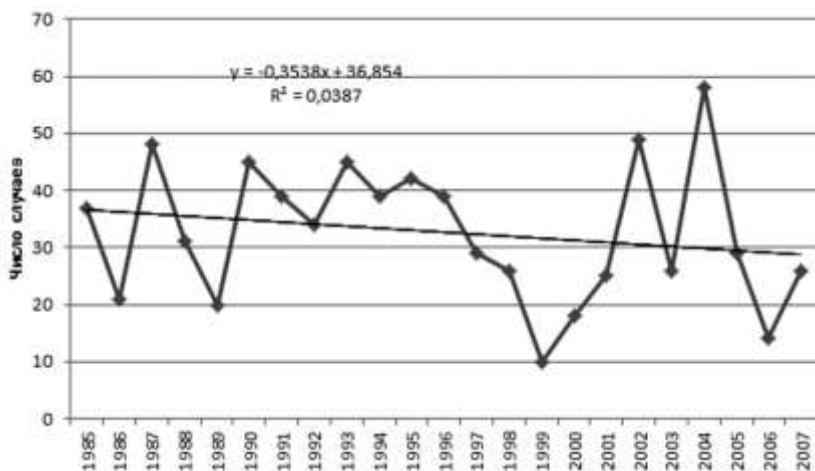


Рис. 7. Многолетние изменения повторяемости сильных ветров.
Ст. Кара-Тюрек ($H = 2600$ м над ур. моря)

Сравнение расчетного риска ущерба и фактических потерь

На примере 2007 г. проанализированы фактические потери, обусловленные сильными ветрами на территории юго-востока Западной

Сибири, по данным «Донесений» со станций о возникновении, характеристике ОЯ, последствиях и сумме материального ущерба (табл. 8).

Т а б л и ц а 8

Сведения о последствиях и непредотвращенных потерях от воздействия сильного ветра в уязвимых секторах экономики. Западно-Сибирское УГМС, 2007 г.

Станция	Дата	Сектор				Ущерб, тыс. руб.
		Энергетика	ЖКХ	Транс-порт	Сельское хозяйство	
1	2	3	4	5	6	7
Новосибирская область						
Северное	02.02	ЛЭП2	РК			8
Довольное	02.05	ЛЭП1, ЛЭП2	РК			1674
Венгерово	02.05	ЛЭП1, ЛЭП2	РК			600
Баган	02.05	ЛЭП1, ЛЭП2	РК			1644
Квашнино	02.05	ЛЭП2	РК			100
Каргат	02.05	ЛЭП1	РК, Д			4464
Карасук	02.05	ЛЭП2	РК, П			2532
Колывань	02.05	ЛЭП2, ОЭ	Д			450
Кочки	02.05	ЛЭП1				600
Кочки (район)	02.05				РК	156
Здвинск	02.05	ЛЭП1, ОЭ	РК			944
Чистоозерное	02.05	ЛЭП1, ОЭ	РК			600
Чаны	02.05	ЛЭП2, А	РК			4000
Северное	02.05		РК			358
Довольное	12.08		РК, Д			–
Тогучин	03.05	ЛЭП1, ЛЭП2				473
Барабинск	13.05		РК			59
Барабинск	26.05		РК			2031
Посевная	05.06		Д		ОЭ	280
Тогучин						
Кемеровская область						
Киселевск	26.02	ОЭ		Т		–
Новокузнецк	26.02			Т		–
Белово	26.02	ЛЭП1, ЛЭП2		Т		370
Белово	26.02	А	А			31000
	ураган					
Белово	28.04	ЛЭП1	РК			–
Топки	03.05		РК			500
Таштагол	22.07	ОЭ	Д			–

Белово | 22.07 | ЛЭП1 | РК | Т | | –

Продолжение табл. 8

1	2	3	4	5	6	7
Алтайский край						
Бийск, Зональная	27.01	ЛЭП1, ОЭ	Д	Т		–
Шипуново	26.01	ОЭ	РК			50
Тогул	19.02	ОЭ		Т		–
Бийск, Зональная	20.02	ОЭ		Т		50
Бийск	24.02	ОЭ		Т		–
Змеиногорск	26.02	ОЭ	РК			–
Краснощеково	26.02	ЛЭП2	РК			5000
Солонешное	26.02		А			30
Шипуново	26.02	ЛЭП1				70
Рубцовск	26.02	ОЭ		Т		113
Усть-Калманка	26.02	ЛЭП1	РК			20
Волчиха	26.02	ЛЭП1, ОЭ				–
Тогул	26.02	ОЭ				–
Усть- Чарышская	26.02	ЛЭП1, ЛЭП2	РК			618
Алейская	ураган					
Алейская	26.02	ЛЭП1	Д			100
Заринск	26.02		РК	Т		2000
Бийск, Зональная	26.02	ЛЭП1		Т		200
Целинное	26.02					20
Славгород	02.05	А, ЛЭП1, ОЭ				–
Заринск	08.05					353
Усть-Чарышская пристань	08.05	ЛЭП1, ЛЭП2, А	РК			150
Троицкое	08.05	ЛЭП1, ОЭ	РК			1500
Краснощеково	08.05	ЛЭП1	РК			700
Змеиногорск	08.05	ЛЭП2, А	Д, РК			40
Поспелиха	08.05	ЛЭП1	РК			170
Волчиха	08.05	ЛЭП1	Д, РК			340
Усть-Калманка	08.05	ЛЭП1, ЛЭП2	РК			825
Целинное	08.05		РК			35
Рубцовск*	08.05	ОЭ	РК			250
Алейская	09.05	ЛЭП1, А				70

Мамонтово	24.05	ЛЭП1, ОЭ	Д		УП	–
Шелаболиха	05.06					10
Шипуново	29.06				УП, РК	710

О к о н ч а н и е т а б л . 8

1	2	3	4	5	6	7
Республика Алтай						
Онгудай	08.05	ЛЭП1	РК			180
Турочак	22.07		РК, А			900

П р и м е ч а н и е. ЛЭП1 — обрыв проводов; ЛЭП2 — падение опор; ОЭ — отключение электроэнергии; А — другие аварии; РК — разрушение кровли; Д — повреждение деревьев; Т — нарушение работы транспорта; УП — уничтожение посевов; РЗ — разрушение производственных зданий. * — гибель двух человек.

Этот год характеризовался наибольшим за 10-летие (2000—2009 гг.) числом дней с указанным явлением (см. рис. 5).

В числе последствий зафиксированы аварии на ЛЭП (обрыв проводов и падение опор с последующим массовым отключением электроэнергии в поселениях), повреждения строений (в основном, крыши домов). Пострадали деревья, посевы сельскохозяйственных культур на больших площадях, осложнялись условия работы транспорта. Наибольший экономический урон (31 млн руб.) нанес ураган в Белово Кемеровской области. В целом, свыше половины экономических потерь (53 %) приходится на энергетический сектор, около трети — на сферу ЖКХ (рис. 8). Сумма реального ущерба в данном году по региону составила 67,4 млн руб. Полагаем, что фактические потери занижены ввиду не полной информации «Донесений», так как в ряде случаев при наличии последствий отсутствует величина ущерба либо сведения ограничены лишь данными о ветре. Кроме того, зафиксирована гибель двух людей, требующая стоимостной оценки этого последствия. Согласно оценкам, представленным в работе [10], величина материальных потерь, которые понесет общество от гибели одного человека, представляет собой значение долей ВВП и основного фонда, умноженное на среднюю продолжительность трудовой жизни (40 лет). Таким образом, при оценке гибели двух человек ущерб составит 15 млн руб. В соответствии с иными оценками [23] среднестатистическая жизнь россиянина составляет в настоящее время порядка 11 млн руб., но при проведении проектных социально-экономических расчетов, связанных с возможностью гибели людей, рекомендуется ориентироваться на сумму 40 млн руб. на одного человека. Принимая первый вариант гуманитарного стоимостного эквивалента, величина фактического ущерба составит 90,2 млн руб., при втором варианте — 147,3 млн руб. К сказанному следует добавить, что

вообще «Донесения» не являются исчерпывающим источником информации о возможных непредотвращенных потерях для экономики региона, создаваемых сильным ветром.

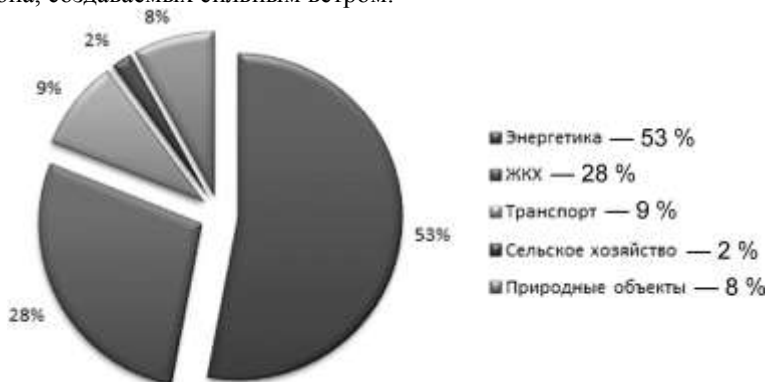


Рис. 8. Распределение непредотвращенных потерь от воздействия сильного ветра. 2007 год

Значение экономического риска ($R_{\text{эж}}$) с использованием косвенных показателей уязвимости объекта составляет 154,5 млн руб. и, следовательно, вполне сопоставимо с зафиксированным реальным ущербом.

С другой стороны, есть основания для уточнения величины потенциального риска ущерба, если учесть следующие факторы.

Расчетный экономический риск отражает режим ветра и его воздействия за весь период 1985—2009 гг. без учета выявленных тенденций уменьшения частоты сильных ветров. Так, число лет с явлением за вторую половину исследуемого периода (1997—2009 гг.) сократилось примерно на 10 %.

Численность населения больших городов целесообразно исключить из расчета риска применительно к территориям субъектов, оценки уязвимости и рисков давать индивидуально для города. Так, в Томске, Новосибирске, двух крупнейших городах Кемеровской области (Кемерово и Новокузнецк) проживает половина жителей соответствующих областей.

По результатам корректировки показателей вероятности (p) и параметра уязвимой части населения $L(s/S)$ расчетный экономический риск ущерба на территории юго-востока Западной Сибири составляет порядка 85 млн руб., что также в целом соизмеримо с величиной фактических потерь.

Заключение

Работа является первым опытом получения новых видов экономической-климатической информации, связанной с оценками уязвимости и риска ущерба от воздействия сильных ветров на территории деятельности Западно-Сибирского УГМС — Томской, Новосибирской, Кемеровской областей, Алтайского края и Республики Алтай. Использован разработанный в ГГО им. А.И. Воейкова эмпирический метод расчета погодно-климатических рисков, создаваемых опасными метеорологическими явлениями.

Получены следующие основные результаты и выводы.

1. На преобладающей территории юго-востока Западной Сибири сильный ветер (25 м/с и более) отмечается практически ежегодно, лишь в Томской области повторяемость лет с опасным явлением составляет 60 %. Режим сильного ветра характеризуется значительным диапазоном одновременного охвата, вплоть до 50—90 % территории субъекта. В среднем площадь, занимаемая ветром, отнесенная к одной станции, составляет порядка 5000 км². В наиболее опасном в ветровом отношении Алтайском крае сильный ветер может наблюдаться до 20 дней в году и более.

2. Ежегодно от воздействия сильных ветров оказываются потенциально уязвимыми порядка 10 тыс. человек в Томской области и Республике Алтай, величина экономического риска от реализации одного явления составляет соответственно 1—6 млн руб. В Кемеровской области число людей, попадающих в зону опасности, создаваемой сильными ветрами, достигает 130 тыс. человек, экономический риск составляет 69 млн руб.; на остальной территории юго-востока Западной Сибири — примерно вдвое меньше.

3. Площадь одновременного охвата 25 % и более территории отмечается в целом по региону каждые 2—3 года, средняя площадь, занимаемая ОЯ, составляет 30—40 % территории субъекта; экономический риск исчисляется сотнями миллионов рублей.

4. Выявлено, что допущение о равной вероятности явления в каждой точке территории не может выполняться применительно к сильному ветру. Проведенная детализация вероятности и уязвимости на примере Новосибирской области показала, что наибольшим рискам ущерба подвержены юго-западные районы области, и в меньшей степени — северная часть территории. Результаты оценки эффективности детализации нацеливают на возможность применения распределительного способа адаптации в пользу проблемного юго-западного района, занимающего степную зону НСО.

5. За последнее 25-летие (1985—2009 гг.) отмечено уменьшение повторяемости сильных ветров и площади охвата. В новом столетии

опасное явление не наблюдалось в Новосибирской и Кемеровской областях в 2003, 2005, 2006, 2008 гг.

6. Расчетные риски ущерба, наносимого сильным ветром, и фактические потери в различных секторах экономики области практически совпадают и составляют соответственно 147,3 и 154,5 млн руб. Как видно, на примере 2007 г. метод ГГО адекватно моделирует потенциальные риски, создаваемые сильными ветрами на территории юго-востока Западной Сибири.

В заключение отметим, что аппарат оценки погодно-климатических рисков далеко не совершенен, и в процессе работы авторы испытывали затруднения и сомнения при анализе материала и формулировке выводов, поэтому готовы к замечаниям, разбору и анализу высказанных положений.

Литература

1. *Бедрицкий А.И., Кориунов А.А., Хандожко Л.А., Шаймарданов М.З.* Основы оптимальной адаптации экономики России к опасным проявлениям погоды и климата // Метеорология и гидрология. 2009. № 4. С. 5—14.
2. *Бедрицкий А.И., Кориунов А.А., Хандожко Л.А., Шаймарданов М.З.* Климатическая система и обеспечение гидрометеорологической безопасности жизнедеятельности России // Метеорология и гидрология. 2004. № 4. С. 120—129.
3. *Кориунов А.А., Волобуев Н.М., Филлин Б.И.* Проведение анализа повторяемости опасных гидрометеорологических явлений и проведение работ по районированию территории России с учетом степени риска их возникновения // МЕТЕОСПЕКТР. 2009. № 4. С. 73—80.
4. *Бедрицкий А.И., Кориунов А.А., Шаймарданов М.З.* Базы данных об опасных гидрометеорологических явлениях на территории России и результаты статистического анализа // Метеорология и гидрология. 2009. № 11. С. 1—5.
5. *Руководство по специализированному климатологическому обслуживанию экономики* / Под ред. Н.В. Кобышевой. СПб.: АСТЕРИОН, 2008. 334 с.
6. *Энциклопедия климатических ресурсов Российской Федерации* / Под ред. Н.В. Кобышевой, К.И. Хайруллина. СПб.: Гидрометеиздат, 2005. 319 с.
7. *Кобышева Ю.А., Галюк Л.П., Панфутова Ю.А.* Методика расчета социального и экономического рисков, создаваемых опасными явлениями погоды // Труды ГГО. 2008. Вып. 558. С. 162—172.
8. *Галюк Л.П., Самолетова Н.А.* Оценка риска, создаваемого смерчами, для Волгодонской АЭС // Труды ГГО. 2008. Вып. 557. С. 225—229.
9. *Панфутова Ю.А.* Оценки рисков, создаваемых опасными метеорологическими явлениями на равнинной территории центральной и южной России // МЕТЕОСПЕКТР. 2009. № 3. С. 30—35.

10. *Русин И.Н.* Индекс потенциальных потерь для анализа потенциальной опасности // Климатические ресурсы и методы их представления для прикладных целей. СПб.: Гидрометеоздат, 2005. С. 184—202.
11. *Кобышева Н.В.* Современное состояние и перспективы развития работ в области прикладной климатологии // Труды ГГО. 2009. Вып. 560. С. 51—67.
12. *Бедрицкий А.И., Коришунов А.А., Коришунова Н.Н., Ламанов В.И., Шаймарданов М.З.* Опасные гидрометеорологические явления, вызываемые ветром, и их влияние на экономику // Метеорология и гидрология. 2001. № 9. С. 5—17.
13. *Панфутова Ю.А., Самолетова О.Д., Макеева О.Д., Романова И.В.* Опасные явления погоды на территории равнинной части Российской Федерации // Труды ГГО. 2007. Вып. 556. С. 145—156.
14. *Руководящий документ РД52.04.563—2002.* Критерии опасных гидрометеорологических явлений и подачи штормового сообщения. СПб.: Гидрометеоздат, 2002. 28 с.
15. *Руководящий документ РД. 52.88.699—2008.* Положение о порядке действий и учреждений и организаций при угрозе возникновения и возникновении опасных природных явлений. Новосибирск, 2008.
16. *Морозова Э.А.* Режим и условия возникновения сильных ветров на юго-востоке Западной Сибири // Труды ЗапСибНИГМИ. 1975. Вып. 15. С. 60—68.
17. *Дроздов О.А., Васильев В.А., Кобышева Н. В. и др.* Климатология. М.: Гидрометеоздат, 1989. 568 с.
18. *Методика* расчета минимально необходимого количества пунктов метеорологических наблюдений. СПб.: ГУ «ГГО», 2008. 13 с.
19. *Баранова А.А., Голод М.П., Меццарская А.В.* Изменение градуированных скоростей ветра на территории России во второй половине XX века // Труды ГГО. 2007. Вып. 556. С. 116—138.
20. *Меццарская А.В., Еремин В.В., Баранова А.А., Майстрова В.В.* Изменение скорости ветра на севере России во второй половине XX века по приземным и аэрологическим данным // Метеорология и гидрология. 2006. № 6. С. 46—58.
21. *Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Комаров А.И., Кусков А.И.* Современные природно-климатические изменения в Сибири: ход среднегодовых приземных температур и давления // География и природные ресурсы. № 3. С. 90—96.
22. *Меццарская А.В., Гетман И.Ф., Борисенко М.М., Шевкунова Э.И.* Мониторинг скорости ветра на водосборе Волги и Урала в XX веке // Метеорология и гидрология. 2004. № 3. С. 83—97.
23. *Быков А.А.* О методологии экономической оценки среднестатистического человека (пояснительная записка) // Проблемы анализа риска. 2007. Т. 4, № 2. С. 178—191.

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ В УСЛОВИЯХ НОВОСИБИРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Л.Н. Романов, Е.Г. Бочкарева, В.Ф. Богданова

*ГУ «Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт», г. Новосибирск*

Введение

Гидрологические исследования с целью прогноза основных гидрологических характеристик неизбежно сопряжены с изучением крупномасштабных процессов в атмосфере, даже если эти характеристики связаны с относительно небольшим регионом. Об этом, в частности, свидетельствуют как работы в области гидрологических прогнозов, так и богатый опыт моделирования расходов и притоков воды в естественные и искусственные водохранилища [1, 2]. Таким образом, задача прогноза поведения рек и водоемов автоматически наследует трудности исследования крупномасштабных процессов в атмосфере и долгосрочного прогнозирования. Кроме того, возникают новые трудности, связанные с тем, что вода, как основной объект при изучении поведения рек и водоемов, может присутствовать в процессе погодообразования в различных фазовых состояниях, что ограничивает или делает практически невозможным применение при моделировании каких-либо известных законов, управляющих атмосферой. В таких условиях моделирование стоков и притоков воды может быть основано лишь на эмпирическом материале и, прежде всего, на данных измерений, которые могли бы быть задействованы в процессе. В условиях, когда гидрологическому исследованию подлежат объекты искусственного происхождения, задача еще более усугубляется, поскольку в этом случае временные ряды данных катастрофически коротки. В результате приходится решать проблему в упрощенном варианте, оценивая, например, лишь тенденцию или превышение некоторого критического уровня развития процесса, при минимальных требованиях к оправдываемости прогнозов.

Принятая в гидрологии система оценивания прогнозов в значительной степени определяет подход, который может использоваться при моделировании, поскольку в данном случае не столько важна (или даже

совсем не важна) величина ошибки, не превосходящей заданную допустимую величину δ , сколько число ошибок, превосходящих эту величину. Таким образом, не столько важна средняя по выборке ошибка прогнозов, сколько наличие больших ошибок или ошибок, превосходящих некоторую допустимую величину. Это означает, что мы при построении модели можем постараться уменьшить число больших ошибок за счет увеличения ошибок маленьких. Заметим, что методы восстановления зависимостей с помощью линейной или нелинейной регрессии основаны на минимизации именно средней по выборке ошибки прогнозов.

Минимизация числа больших ошибок могла бы быть реализована сведением задачи к линейному программированию, где проблема решается путем минимизации некоторого функционала при линейных ограничениях [3]. Но в этом случае мы можем добиться лишь минимума некоторой суммарной ошибки, превосходящей заданную критическую величину. Однако в нашем случае требуется минимизация именно числа таких ошибок.

В настоящей статье описана модель, основанная на минимизации числа как больших ошибок, так и средней ошибки по ситуациям, для которых ошибки не превосходят заданную критическую величину. Такая модель предполагает в качестве первого этапа ее построения аппроксимацию зависимости с помощью непрерывной функции. Далее, в зависимости от результатов аппроксимации строится разделяющая гиперплоскость, позволяющая выделить некоторую критическую область в многомерном пространстве, в которую попадают ситуации с большими ошибками. Для таких ситуаций вырабатывается дополнительное правило, позволяющее в некоторых случаях определить прогнозируемое значение с меньшей ошибкой.

Исходные данные и постановка задачи

Для моделирования поведения уровня воды в Новосибирском водохранилище использовался многолетний архив ситуаций, созданный ранее в лаборатории для построения моделей прогноза погоды различных масштабов. Основные параметры, которые были извлечены из этого архива, составляют данные, которые использовались ранее для построения моделей долгосрочного прогноза температуры и осадков. В эти данные входили среднемесячная температура, суммарные за месяц осадки для 25 станций Западной Сибири, информация об общей циркуляции атмосферы, солнечной активности, эфемериды планет, данные о Луне и др.

Для создания моделей гидрологического прогноза был взят долгосрочный архив ситуаций, который ранее использовался для долгосрочного прогноза температуры и осадков. Далее для создания модели долгосрочного прогноза расхода и притока воды в Новосибирское водохранилище в архив были включены среднемесячные и декадные расходы воды по створу реки Обь, среднемесячные и декадные данные по притоку воды в водохранилище, среднемесячные расходы воды по шести рекам, впадающим в Обь. Кроме этого сюда вошли данные о максимальных запасах воды в снеге, выпавшем за зиму в горной части р. Обь, бассейне Оби от г. Барнаула до ГЭС, бассейнах рек Бия, Катунь, Алей, Чарыш, Чумыш, Бердь.

С помощью этих данных, снятых за все месяцы года, предполагалось построить модель, прогнозирующую основные гидрологические характеристики (приток и расход) на 3—4 месяца вперед. При этом, поскольку условия формирования водного режима в регионе существенно различаются в зависимости от времени года, правило прогнозирования для каждого из прогнозируемых месяцев (апрель—сентябрь) вырабатывалось отдельно.

Представим исходный материал в виде конечного ряда ситуаций x_i и ряда y_i известных прогнозируемых значений y_i , соответствующих этому ряду

$$\begin{aligned} x_1, \dots, x_N, \\ y_1, \dots, y_N. \end{aligned} \quad (1)$$

Тогда задача будет состоять в том, чтобы построить функцию $f(x)$ по этому материалу, удовлетворяющую определенным статистическим критериям. В нашем случае эта функция должна удовлетворять критерию минимума функционала

$$J(f(x)) = \sum_i \left(\frac{y_i - f(x_i)}{p(x_i)} \right)^2, \quad (2)$$

называемого средним риском. Здесь $p(x) \leq 1$ — известная функция координат, а минимум ищется по всем непрерывным функциям $f(x)$ заданного класса на всем исходном множестве ситуаций (1). Таким образом, минимум функционала (2) определяет не только вид функции f , но и совокупность параметров, от которых она должна зависеть.

Непременным условием постановки задачи обучения с целью определения неизвестной зависимости является случайность и независимость поступления ситуаций, осуществляемое согласно некоторому

фиксированному распределению. Однако на практике текущие ситуации не поступают случайно и независимо, а берутся из некоторого доступного временного интервала, причем длина такого интервала может быть крайне ограничена. Рассматривая модели для каждого прогнозируемого месяца отдельно, мы тем самым еще более сокращаем используемый ряд, что не может не оказывать отрицательных последствий на результат моделирования. Однако подобная детализация позволяет существенно упростить выборочное распределение и тем самым существенно ограничить область поиска аппроксимирующей функции.

Моделирование с помощью непрерывных функций

Простейшей моделью, которая может быть построена по данным, — это линейная модель, использующая для предсказания линейную функцию

$$f(x) = a_1x^1 + \dots + a_nx^n + a_0,$$

обладающую свойством на исходном множестве ситуаций (1) минимизировать функционал

$$\sum_{i=1}^N (y_i - f(x_i))^2.$$

Формальное построение такой функции не составляет большого труда. Трудности возникают тогда, когда встает вопрос о выборе аргументов, ее определяющих. При построении моделей стоков и расходов воды в регионе Новосибирского водохранилища выбор параметров, или аргументов функции, осуществлялся с помощью скользящего контроля [4], который по существу есть один из подходов, используемых для минимизации среднего риска. Суть этого подхода состоит в следующем. Обозначим через $f_l(x)$ функцию, полученную путем минимизации функционала

$$\sum_{k=1}^{N-1} (y_k - f_{(l)}(x_k))^2$$

на множестве ситуаций (1), из которого исключена ситуация с индексом l . Путем поодиночного исключения из множества (1) всех N ситуаций может быть получено N функций:

$$f_{(1)}(x), \dots, f_{(N)}(x),$$

каждую из которых определяет $N - 1$ ситуация.

Для организации процедуры с целью получения оценки $f(x)$ вычислим значения

$$\delta_i = y_i - f_{(i)}(x), \quad (i = 1, \dots, N),$$

которые, в соответствии с терминологией [5], будем называть псевдо-значениями скользящего контроля. Совокупность псевдозначений, или вектор-столбец $\delta = \{\delta_1, \dots, \delta_N\}^T$ определит среднеквадратичную ошибку скользящего контроля:

$$\Delta = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_i \delta_i^2},$$

которая может служить характеристикой качества аппроксимации неизвестной зависимости с помощью функции $f(x)$. Вычисляя таким образом Δ для всех подмножеств из сходных параметров, мы можем выбрать такое подмножество, которое соответствует наименьшему значению Δ или значению скользящего контроля.

На рис. 1 изображена кривая поведения ошибок скользящего контроля в зависимости от размерности упорядоченного пространства исходных параметров. Для сравнения приведена кривая поведения средней квадратичной ошибки, вычисленной по всей выборке. Такая кривая всегда располагается ниже на графике и всегда монотонно убывает вместе с увеличением размерности пространства. Кривая же ошибок скользящего контроля, как правило, имеет один минимум, который и должен

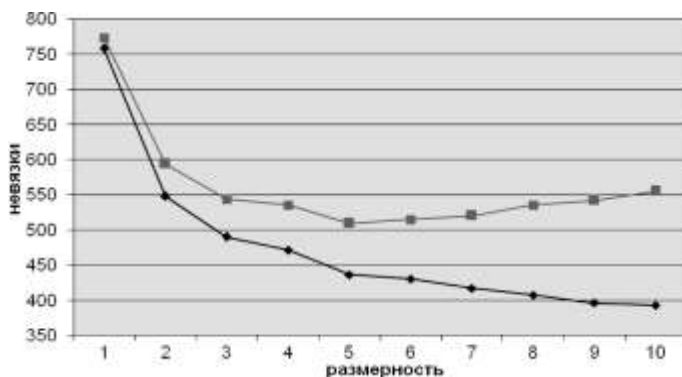


Рис. 1. Кривые поведения ошибок при моделировании расхода воды. Нижняя кривая соответствует среднеквадратичным ошибкам для соответствующих размерностей, верхняя, — ошибкам скользящего контроля

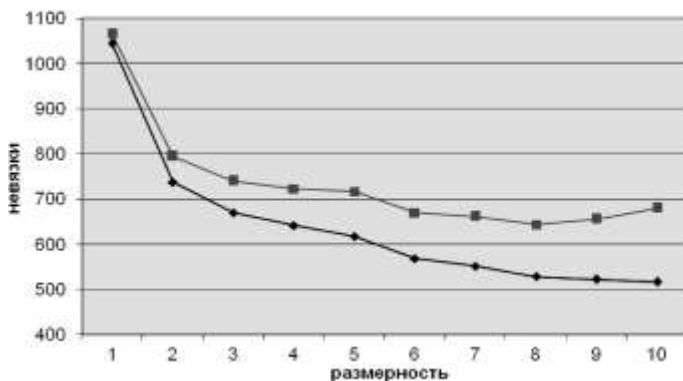


Рис. 2. Кривые поведения ошибок при моделировании притока воды. Нижняя кривая соответствует среднеквадратичным ошибкам для соответствующей размерности, верхняя — ошибкам скользящего контроля

определять оптимальную размерность пространства. В данном конкретном случае минимум достигается при числе параметров, равном 5. Данные, по которым были получены кривые на рис. 1, использовались для построения правила предсказания расхода воды в мае с заблаговременностью в 4 месяца. Однако аналогичное поведение соответствующих кривых наблюдается и на других месяцах, причем число информативных параметров, как правило, не превосходит 10—12 единиц, а в среднем оно колеблется около 6.

На рис. 2 изображены аналогичные кривые, построенные для случая, когда прогнозировался приток в Новосибирское водохранилище. Модель строилась для прогноза притока в январе на четыре месяца вперед. Здесь также имеется достаточно ярко выраженный минимум скользящего контроля, который и определяет оптимальную размерность 8.

Учитывая сложность процессов, протекающих в атмосфере, от которых зависит гидрологический прогноз, надежда получить какой-либо положительный результат, основываясь только на линейных методах, чрезвычайно слаба. Поэтому все подходы при прогнозе гидрологических характеристик реализуются с помощью аппроксимации либо кусочно-линейной, либо полиномиальной.

Нелинейный подход с целью прогноза может быть реализован также с помощью кусочно-линейной аппроксимации. Одну из возможностей реализации такой аппроксимации представляет собой кусочно-линейная двухуровневая модель, предназначенная для прогноза непрерывно изменяющихся метеорологических элементов. Такая модель

строится следующим образом: на первом этапе строится несколько линейных функций для аппроксимации зависимости при различных заблаговременностях прогноза. Число таких заблаговременностей зависит от длины исходного ряда и должно определять в конечном итоге максимально допустимый интервал предыстории процесса. Далее, на втором уровне, исходные данные преобразуются с помощью полученных на первом этапе функций в некоторые обобщенные параметры, которые затем используются для построения функции второго уровня, определяющей окончательный прогноз. При этом все линейные функции, как первого, так и второго уровня, строятся путем минимизации среднего риска.

Главным достоинством такой модели является возможность с ее помощью определять не только интервал предыстории процесса, но и проследить развитие процесса, предшествовавшего прогнозируемой погодной ситуации. Другим важным достоинством модели является ее способность усваивать практически неограниченное количество регулярных данных, поступающих через равные временные интервалы.

Двухуровневая кусочно-линейная модель была реализована для целей прогноза стока и расхода воды в окрестностях Новосибирского водохранилища и уже несколько лет используется в практике СибУГМС в качестве вспомогательной. Впоследствии эта модель была модифицирована и вновь подвергнута испытанию с участием дополнительных гидрологических параметров.

Кусочно-альтернативная модель

Пусть, как и ранее, выборка исходных ситуаций и соответствующих им значений прогнозируемого элемента представлена в виде рядов (1). Используя эту выборку, построим функцию $\tilde{\varphi}(x)$, удовлетворяющую условию

$$\min_{\varphi} \sum_{i=1}^N (y_i - \varphi(x_i))^2 = \sum (y_i - \tilde{\varphi})^2, \quad (3)$$

где минимум функционала в общем случае ищется по всем классам задаваемых функций и всем подгруппам из исходно задаваемых параметров. Однако для простоты написания будем предполагать, что минимум (3) ищется по коэффициентам исходно заданной линейной функции. Иначе говоря, найденная функция $\tilde{\varphi}$ есть линейная функция тех же исходных параметров.

Пусть далее величина δ обозначает верхнее значение ошибки, выше которого прогноз с помощью модели (1) считается неоправдавшимся. В этом случае всю исходную выборку можно разделить на две части: первая — это все ситуации X (назовем эту выборку A), для которых ошибка прогноза мала ($\varepsilon_i \leq \delta$), и вторая — это когда все ситуации из X (назовем их множеством B) превосходят по величине δ ($\varepsilon_i \geq \delta$).

Если число ситуаций множества B достаточно велико, то по этим ситуациям также может быть построена аппроксимирующая функция ϕ , минимизирующая средний квадрат ошибки:

$$\min_{\phi} \sum_B (y_i - \phi(x_i))^2 = \sum_B (y_i - \tilde{\phi})^2. \quad (4)$$

Таким образом, будем иметь следующее правило для прогнозирования: если ситуация x_p принадлежит множеству A , то

$$y = \tilde{\phi}(x_p), \quad x_p \in A,$$

а если множеству B , то

$$y = \tilde{\phi}(x_p), \quad x_p \in B.$$

Разбивая таким образом исходные множества на два подмножества и строя аппроксимирующие функции на каждом из этих подмножеств, мы сможем избежать больших ошибок, по крайней мере на исходной выборке ситуаций. По существу, мы тем самым строим два цилиндра в многомерном пространстве:

$$\begin{aligned} (y - \phi(x))^2 &= \delta^2, \\ (y - \phi(x))^2 &= \delta^2, \end{aligned}$$

так, что все точки исходного множества (или их подавляющее большинство) находятся внутри этих цилиндров. Цилиндры, хотя и могут пересекаться, тем не менее общих точек из исходного множества они не имеют. Первый цилиндр по самому построению покрывает все точки множества A , второй же цилиндр покрывает далеко не все точки этого множества.

Для того чтобы знать, каким правилом воспользоваться при поступлении очередной ситуации x , не принадлежащей исходному множеству, разделим исходное множество на два класса с помощью гиперплоскости $(ax) = c$, причем так, чтобы множество точек A находилось по одну его сторону, а множество точек B — по другую. Иначе говоря, найдем такой вектор a и коэффициент c , что для любого x_i имеют место неравенства

$$(ax_i) \leq c, \text{ если } x_i \in A;$$

$$(ax_i) \geq c, \text{ если } x_i \in B.$$

Если существует гиперплоскость $(ax) = c$, разделяющая множества A и B , то мы можем естественным образом поставить в соответствие этим множествам классы точек. Например, к первому классу отнесем точки полупространства $(ax) \leq c$, а ко второму — точки, попадающие в полупространство $(ax) \geq c$.

В нашем конкретном случае к первому классу будут относиться точки, на которых ошибки первой регрессии малы ($\varepsilon_i \leq \delta$), ко второму — точки, на которых эти ошибки достаточно велики ($\varepsilon_i > \delta$). Заметим однако, что при таком построении ошибка регрессии, соответствующая первому классу, будет смещенной, поскольку среднее значение для первой регрессии оценивается по всем точкам $A + B$. Для того чтобы исключить это несоответствие, надо скорректировать функцию φ , взяв в качестве исходной выборки только ситуации множества A . Результат от этого может только улучшиться, по крайней мере в смысле минимума среднеквадратического отклонения, поскольку из исходного множества удаляются все соответствующие большим ошибкам ситуации.

Резюмируя, можно выделить следующие основные этапы построения модели.

1. Построение функции $\varphi(x)$ по всем исходным ситуациям.
2. Разделение исходной выборки на две группы, A и B , в зависимости от величины соответствующих им ошибок.
3. Построение функции $\varphi(x)$ по ситуациям группы B .
4. Построение гиперплоскости, разделяющей множества A и B .
5. Коррекция функции $\varphi(x)$ путем исключения из исходной выборки ситуаций, соответствующих большим ошибкам.

Текущее использование модели предполагает лишь две операции.

1. Для вновь поступившей ситуации x_k вычисляем скалярное произведение (αx_k) и определяем, по какую сторону от гиперплоскости $(\alpha x) = c$ эта ситуация расположена.
2. В зависимости от принадлежности к классу текущей ситуации x_k вычисляем одно из двух значений $\varphi(x_k)$, или $\phi(x_k)$, которое и определяет прогноз.

Рассмотренная конструкция не обязательно должна приводить к существенному повышению точности прогнозов: все зависит в данном случае от исходного распределения ситуаций и от исходной выборки ситуаций. Однако никакие наши действия не должны были привести к ухудшению прогнозов, в сравнении с прогнозами с помощью одной функции, поскольку все эти действия были направлены на локализацию

больших ошибок, и если нам удалось это сделать хотя бы в какой-то степени, то это уже должно давать эффект. В противном случае автоматически функционирует лишь первый этап построения, когда решение принимается лишь на основе одной аппроксимирующей функции, построенной по всему материалу.

Описанная в настоящем разделе модель фактически использует три уровня преобразования исходных данных: на первом строится регрессия, на втором разделяющая гиперплоскость, и далее по выделенным критическим ситуациям вновь строится регрессия. Естественно было бы классифицировать такую модель как трехуровневую кусочно-альтернативную модель. В дальнейшем же для краткости будем называть эту модель кусочно-альтернативной (модель 2) в отличие от кусочно-линейной двухуровневой модели, которую будем называть кусочно-линейной моделью (модель 1).

Модель, использующая для прогноза разделяющую гиперплоскость, достаточно сложна для построения. Однако только таким образом мы, оставаясь в рамках чисто формального подхода, могли учитывать те специфические климатические и географические условия, которые используются синоптиками при неформальном прогнозировании.

Эксперименты и выводы

С использованием описанных выше инструментов были проведены эксперименты по восстановлению зависимостей с целью построения моделей долгосрочного прогноза притока и расхода воды в районе Новосибирского водохранилища. При этом в качестве исходной информации использовались ряды данных начиная с 1936 г., включающие новые физические параметры, призванные наиболее полно отражать гидрологические процессы в регионе.

По этим данным были построены модели притока и расхода воды в регионе для различных прогнозируемых месяцев и проведены сравнения с прежними результатами, полученными в условиях отсутствия в архиве важных гидрологических характеристик.

В табл. 1 приведены оценки оправдываемости прогнозов притока и расходов воды в регионе для кусочно-линейной (модель 1) и кусочно-альтернативной модели (модель 2). Оценка прогнозов проводилась в соответствии с «Наставлением по службе прогнозов», разд. 3, ч. 1 [6]. Прогнозы с помощью модели 1 были взяты из материалов оперативной практики 2004—2008 гг. Прогнозы по модели 2 получены в результате авторских испытаний. Как видно из табл. 1, оправдываемость прогнозов по модели 2 превосходит оправдываемость прогнозов по мо-

дели 1. При этом преимущество сохраняется как при прогнозе расхода воды в створе Барнаул — Обь, так и при прогнозе притока воды в Новосибирское водохранилище. Для сравнения в табл. 4 приведены оправдываемости официальных прогнозов притока и расходов воды, полученные на том же материале. Как видно из табл. 1 и 2, оправдываемость прогнозов ГМЦ выше оправдываемости прогнозов по модели 1 и несколько ниже оправдываемости прогнозов по модели 2.

Подробную картину оправдываемости прогнозов по модели 2 и прогнозов ГМЦ для каждого из шести прогнозируемых месяцев можно проследить по табл. 3—6.

Таблица 1

Оправдываемость (%) прогнозов расходов воды р. Обь — г. Барнаул и притока воды в Новосибирское водохранилище с помощью кусочно-линейной модели (модель 1) и прогнозов с помощью кусочно-альтернативной модели (модель 2) за апрель — сентябрь 2004—2008 гг.

Год	Модель 1		Модель 2	
	Расход воды р. Обь — Барнаул	Приток воды в Новосибирское водохранилище	Расход воды р. Обь — Барнаул	Приток воды в Новосибирское водохранилище
2004	67	67	83	83
2005	83	83	83	100
2006	50	50	83	67
2007	67	50	67	67
2008	0	0	83	83
Среднее	53	50	80	80

Таблица 2

Оправдываемость (%) прогнозов расходов воды р. Обь — г. Барнаул и притока воды в Новосибирское водохранилище с помощью кусочно-линейной модели (модель 1) и прогнозов ГМЦ, за апрель—сентябрь 2004—2008 гг.

Год	Модель 2		ГМЦ	
	Расход воды р. Обь — Барнаул	Приток воды в Новосибирское водохранилище	Расход воды р. Обь — Барнаул	Приток воды в Новосибирское водохранилище
2004	83	83	67	83
2005	83	100	83	83

2006	83	67	83	67
2007	67	67	50	67
2008	83	83	67	83
Среднее	80	80	70	77

Таблица 3

**Оправдываемость прогнозов притока воды (%) в Новосибирское
водохранилище (модель 2)**

Год	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Среднее
2004	100	0	100	100	100	100	83
2005	100	100	100	100	100	100	100
2006	0	100	100	100	100	0	67
2007	100	100	0	100	100	0	67
2008	100	100	100	0	100	100	83
Среднее	80	80	80	80	100	60	80

Таблица 4

**Оправдываемость прогнозов притока воды (%) в Новосибирское
водохранилище (прогнозы ГМЦ)**

Год	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Среднее
2004	100	0	100	100	100	100	83
2005	100	100	0	100	100	100	83
2006	100	0	0	100	100	100	67
2007	0	100	0	100	100	100	67
2008	100	100	100	100	100	0	83
Среднее	80	60	40	100	100	80	77

Таблица 5

**Оправдываемость прогноза расходов воды (%) по створу реки
Обь—Барнаул (модель 2)**

Год	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Среднее
2004	100	0	100	100	100	100	83
2005	100	100	100	100	100	0	83
2006	100	100	100	100	100	0	83
2007	100	100	0	0	100	100	67
2008	100	100	100	100	100	0	83
Среднее	100	80	80	80	100	40	80

Таблица 6

**Оправдываемость прогноза расходов воды (%) по створу реки
Обь — Барнаул (прогнозы ГМЦ)**

Год	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Среднее
2004	0	0	100	100	100	100	67

2005	100	100	0	100	100	100	83
2006	100	0	100	0	100	100	83
2007	0	100	0	0	100	100	50
2008	0	100	100	100	100	0	67
Среднее	40	60	60	80	100	80	70

Как видно из табл. 5, 6, ошибки прогнозов с помощью модели 2 и ошибки официальных прогнозов часто совпадают. Это можно объяснить двумя причинами: первое — это недостаточность «опыта», обусловленная короткими временными рядами; второе — это неполное описание исходных ситуаций, по которым осуществляется прогнозирование. Если первая причина еще долгие годы может представлять серьезное препятствие на пути создания надежных прогнозов, то вторую причину можно в значительной степени преодолеть. Для этого надо более детально и аккуратно использовать уже существующие исходные данные.

Наибольшая оправдываемость прогнозов с помощью модели имеет место в августе, наименьшая — в сентябре. Стопроцентная оправдываемость для всех пяти лет сохраняется только для августа месяца.

Один из важных выводов, который может быть сделан из экспериментов по аппроксимации неизвестных функций, состоит в том, что при прогнозе стока полиномиальная аппроксимация не дает никаких преимуществ по сравнению с линейной. Причина этого может заключаться в том, что при прогнозе на большие сроки, и к тому же по характеристикам, осредненным по большим временным интервалам, возможно лишь грубое описание происходящих при этом процессов, даже если данные при этом достаточно точны и их имеется достаточное количество. По этой причине описание процессов в условиях применения критерия минимума среднего риска упрощается, и, как правило, сложная нелинейная зависимость вырождается в простую линейную. Однако это не означает, что следует пренебрегать использованием аппарата нелинейной аппроксимации; при восстановлении диагностических связей, даже в условиях осредненных по времени параметров, полезные нелинейные зависимости могут восстанавливаться достаточно точно. Это частично подтверждается экспериментами по восстановлению диагностических зависимостей притока и расходов воды. Дальнейший же прогресс в области использования полиномиальной аппроксимации может быть связан лишь с включением данных прямого измерения или данных с меньшим интервалом пространственного или временного осреднения.

Литература

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. *Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2. Краткосрочные прогнозы расхода и уровня воды на реках.* Л.: Гидрометеиздат, 1989. 245 с.
3. *Дуда Р., Харт П.* Распознавание образов и анализ сцен. М.: Мир, 1976.
4. *Романов Л.Н.* Минимизация риска и восстановление пропусков в атмосферных данных // Сиб. журн. вычисл. математики. 2009. Т. 12, № 2.
5. *Gray H.L., Schucany W.R.* The generalized jackknife statistic. M. Dekker, Inc., N. Y.
6. *Наставление по службе прогнозов, разд. 3, часть 1.* Ленинград, 1962.
7. *Романов Л.Н.* О выборе моделей для статистического прогноза // Труды ЗапСибНИГМИ. 1990. Вып. 93.

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ В УСЛОВИЯХ НЕФТЕДОБЫЧИ НА ЮГЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

С.П. Казьмин, О.В. Климов

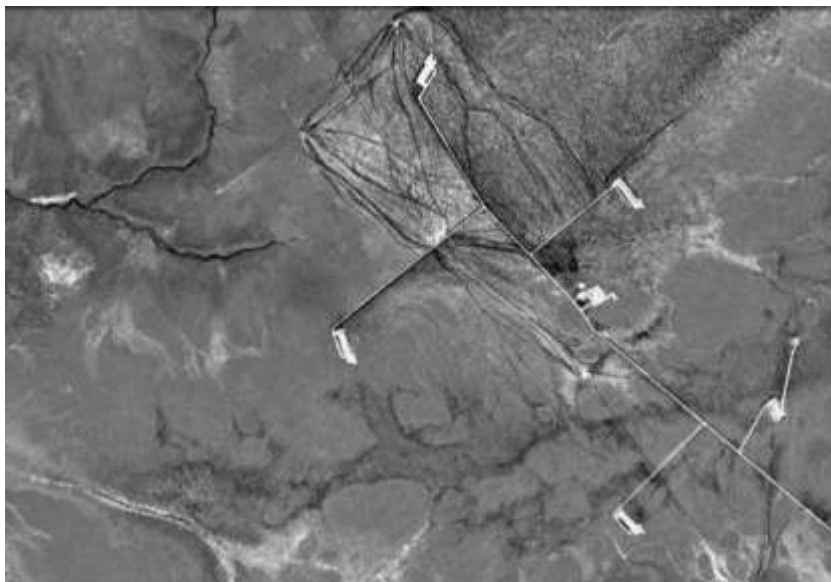
*ГУ «Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт», г. Новосибирск*

Открытие во второй половине XX в. в Новосибирской области первых месторождений углеводородного сырья подтвердило перспективность южных районов Западной Сибири на нефтегазоносность. В настоящее время на территории области насчитывается 7 месторождений нефти (в том числе 5 — с запасами растворенного газа и одно — газоконденсата) и выявлено 22 перспективных площади на нефть. Основные запасы и ресурсы углеводородного сырья в Новосибирской области сосредоточены в Северном и Кыштовском районах на границе с Омской и Томской областями [1]. В XXI в. началось вовлечение углеводородного сырья трех месторождений (Верх-Тарского, Восточно-Тарского и Малоичского) в хозяйственный оборот. Все они расположены на малоосвоенной периферийной части территории Северного административного района. Эксплуатация нефтепромыслов ведется двумя компаниями — «Новосибирскнефтегаз» и «Севернонефтегаз», входящими в структуру ТНК-ВР. Базовым объектом для формирования нефтедобычи является Верх-Тарское нефтяное месторождение.

Наряду с положительной социально-экономической значимостью развития нефтедобывающего комплекса в современных рыночных условиях, наращивание объема отбора флюидов из недр сопровождается разнообразными техногенными воздействиями на естественную природу и создает порой весьма негативные последствия, преобразующие ландшафты. Нефтедобывающий комплекс приурочен к южной краевой части сильно заболоченной Васюганской равнины. Для района характерны слаборасчлененная поверхность, малая мощность зоны аэрации, близкое залегание от поверхности грунтовых и напорных водоносных горизонтов, тесная взаимосвязь их с поверхностными водами. Рямы (заболоченные леса) и открытые болота покрывают около 80 % площади месторождений. Территория слабо расчленена сетью неглубоко врезан-

ных эрозионных понижений с пологими склонами. Ручьи и речки стекают с заболоченных плоских междуречий [2]. Эксплуатация нефтепромыслов с комплексом инженерных сооружений по добыче, сбору, хранению и подготовке нефти к транспортировке, магистральные нефтепроводы, компрессорные станции, подъездные трассы к кустовым площадкам приводят, с одной стороны, к изменению качественного состава среды обитания, а с другой — к снижению естественного самовосстановления природных ландшафтов (см. рисунок). Все это способствует накоплению загрязняющих веществ, в первую очередь нефтепродуктов, в поверхностных и подземных водах, почвогрунтах зоны аэрации, возникновению опасных ситуаций для существования растительного покрова и животного мира на территории как нефтедобычи, так и на прилегающих территориях.

Одной из особенностей нефтедобывающего комплекса является отсутствие автодорог, линий электропередач и удаленность от ближайшей железнодорожной транспортной точки на 200 км, что создает главную сложность при освоении запасов углеродного сырья. В начале текущего века транспортировка продукции нефтевозами по бездорожью значительно осложняла экологическую обстановку по пути следования с нефтепромыслов. Были случаи опрокидывания нефтевозов. В 2003 г. ОАО



Космоснимок участка Верх-Тарского нефтепромысла

«Новосибирскнефтегаз» удалось решить главную проблему Верх-Тарского месторождения — построить 180 километровый трубопровод до пункта приема нефти компании «Транснефть» — Барабинской нефтеперерабатывающей станции, подключенной к магистральному нефтепроводу Омск — Ангарск, для поставок сырья на Ачинский и Омский НПЗ. В настоящее время система транспортировки нефти Малоичского промысла подключена к нефтепроводу Верх-Тарское — Барабинск, что позволяет компании ОАО «Севернонефтегаз» эффективно эксплуатировать месторождение при полном отсутствии асфальтированной автодороги протяженностью 70 км до р. ц. Северное.

Верх-Тарское нефтяное месторождение открыто в 1970 г. и считается самым крупным в Новосибирской области. Площадь лицензионного участка составляет 57 411 га. По уточненным данным, полученным в 2005 г., извлекаемые запасы месторождения — 32 млн т, геологические — 68 млн т нефти. Добываемая нефть по своим свойствам очень близка к марке Brent и характеризуется высоким качеством с минимальным количеством примесей. На месторождении размещаются объекты, являющиеся потенциальными источниками загрязнения компонентов природной среды: кустовые площадки с эксплуатационными скважинами на нефть; одиночные скважины; площадка центрального пункта сбора нефти (ЦПСН); площадка установки предварительного сброса воды (УПСВ); напорный нефтепровод до НПС «Барабинская» (длина в пределах месторождения — 8,4 км); карьеры и участок захоронения буровых отходов; полигон промышленных и твердых бытовых отходов; трассы коридоров коммуникаций (нефтеесборные трубопроводы, водоводы). Возведение автодорог до кустовых площадок из-за срезания грунта и его перемещения преобразовало территорию, прилегающую к насыпям дорог. Подъездные трассы привели к изменению качественного состава среды обитания и снижению естественного самовосстановления природных комплексов. В результате перехвата поверхностного стока воды был нарушен гидрологический режим болотного стока. Изъятие территории под прокладку нефтепровода от месторождения до НПС «Барабинская» привело к нарушению естественных природных ландшафтов, затрагивающих абиотическую среду экосистем. Анализ цифровой информации дистанционного зондирования Земли (космоснимков Landsat), полученных в 2001 и 2003 гг. на площадь месторождения и прилегающих к нему территорий, свидетельствует, что на значительных пространствах прокладка нефтепровода изменила режим поверхностного и грунтового стоков в пределах коридора. Это привело

к повышению обводнения и возникновению вслед за этим перестройки структуры растительного покрова.

Малоичское нефтяное месторождение открыто в 1974 г. и расположено на землях Северного лесхоза. Ближайшее разрабатываемое Верх-Тарское нефтяное месторождение находится в 5 км на восток от участка. Площадь лицензионного участка составляет 46 км². Территория считается непригодной для сельскохозяйственного использования. В пределах месторождения основными потенциальными источниками загрязнения компонентов природной среды являются: эксплуатационные скважины на нефть; шламонакопитель, заполненный отходами бурения и нефтепродуктами; факелы высокого и низкого давления.

Площадь Восточно-Тарского нефтепромысла, открытого в 1986 г., составляет 33,7 га. Степень природно-антропогенной нарушенности территории месторождения оценивается как слабая. Эксплуатация нефти ведется одной скважиной. Ввиду отсутствия дорог и высокой заболоченности местности в летнее время проезд до скважины практически невозможен. Нефтедобыча проводится по коридору коммуникаций зимой.

С целью изучения экологической ситуации, выявления и установления характера влияния техногенных объектов по договору с ОАО «Новосибирскнефтегаз» и «Севернонефтегаз» с 2005 г. на лицензионных площадях Верх-Тарского и Малоичского нефтепромыслов, а с 2009 г. и на территории Восточно-Тарского месторождения ГУ «СибНИГМИ» по специально разработанным программам, учитывающим требования лицензионного соглашения, проводятся экологические исследования. Кроме того, регулярному изучению подвергаются участки перехода межпромыслового нефтепровода с водными преградами по всей трассе от месторождений до нефтеперерабатывающей станции. Содержание программ соответствует экологическому мониторингу компонентов природной среды (атмосферного воздуха, снежного покрова, поверхностных и грунтовых вод, подземных вод из водозаборных скважин для водоснабжения вахтовых поселков и для технического обеспечения кустовых площадок по добыче нефти, донных отложений, почвогрунтов зоны аэрации). В результате проведенных исследований получена информация о фоновом состоянии и причинах загрязнения природной среды. Ежегодно дается оценка экологического состояния рассматриваемых месторождений на основе сравнения наблюдаемых показателей с полученными данными предыдущих лет.

За период ведения экологического мониторинга объектами контроля при оценке состояния атмосферного воздуха на лицензионных территориях Верх-Тарского и Малоичского месторождений были подфакель-

ные наблюдения в зоне влияния факельных установок. Уровень загрязнения воздуха по углеводородам суммарным, сероводороду, бенз(а)-пирену, диоксиду серы не превысил предельно-допустимую максимальную разовую концентрацию (ПДК_{мр}). Наибольший вклад в загрязнение атмосферы по массе выбросов вносят оксид углерода (до 6,0 мг/м³, до 1,2 ПДК_{мр}), диоксид азота (до 0,09 мг/м³, до 1,06 ПДК_{мр}), сажа (до 0,20 мг/м³, до 1,3 ПДК_{мр}) и пыль (до 0,60 мг/м³, до 1,2 ПДК_{мр}). Геохимическое опробование снежного покрова дало оценку атмосферному потоку загрязняющих веществ. Снег как естественный накопитель является индикатором не только загрязнения атмосферы, но и последующего загрязнения почв и вод. При интерпретации данных были использованы предельно-допустимые концентрации (ПДК_{рыб}), разработанные для оценки условий водных ресурсов, используемых в рыбохозяйственных целях (Утв. Приказом Росрыболовства от 18.01.2010 г. № 20). Во всех пунктах наблюдения отмечены повышенные концентрации нефтепродуктов (0,21—0,38 мг/дм³; 4,2—7,6 ПДК_{рыб}) и фенолов (0,002—0,003 мг/дм³; 2—3 ПДК_{рыб}).

Как показывает опыт разработки нефтяных месторождений, одним из наиболее уязвимых компонентов природной среды являются поверхностные воды. Их опробование выполнялось таким образом, чтобы обеспечить обследование местного бассейна поверхностного стока с выявлением параметров гидрохимического режима [3]. В результате работ были определены водные объекты, находящиеся в фоновых и нарушенных районах. В границах лицензионных участков опробовались водотоки (реки Тара и Мал. Ича) и их притоки, водные объекты озерно-болотного комплекса. Величина водородного показателя, содержания хлоридов, БПК₅, фенолов и АПАВ во всех пробах не превысили нормативных концентраций. В запредельных концентрациях в поверхностных водах во всех пунктах наблюдения выявлены марганец (до 0,19 мг/дм³; до 19 ПДК_{рыб}), железо (до 1,1 мг/дм³; до 11 ПДК_{рыб}), что обусловлено природным фактором — болотным формированием водоемов и водотоков и соответствует естественным значениям для рассматриваемого региона. Отчетливой зависимости количества растворенных нефтепродуктов в поверхностных водах в пределах месторождений и за границами нефтепромыслов (выше и ниже по течению от места пересечения водотоков с подводными переходами нефтепровода) от времени года не наблюдалось. В пунктах опробования во все сезоны содержания нефтепродуктов в поверхностных водах выявлены выше нормы — 0,105—0,22 мг/дм³ (2,1—4,4 ПДК_{рыб}).

По данным опробования концентрации нитратов, марганца, хлоридов, нефтепродуктов и величина водородного показателя в илисто-глинистых донных отложениях водотоков и мочажин озерно-болотного комплекса отвечают нормируемым показателям, предъявляемым к почвам, и не превышают ПДК и фоновые значения. Содержания в почвогрунтах зоны аэрации общего гумуса, хлоридов, нитратов, фосфатов, свинца, железа, хрома, ртути, бенз(а)пирена, марганца и никеля находятся в пределах их естественных колебаний, за исключением цинка (42,5—70,2 мг/кг; 1,8—3 ПДК). Сравнивая данные по содержанию органических загрязнителей в почвогрунтах с классификацией [4], можно говорить о слабом и умеренном загрязнении нефтепродуктами (0,58—1,72 г/кг).

Для сбора, утилизации и переработки отходов на территории Верх-Тарского месторождения в 2008 г. был введен частично в эксплуатацию полигон для нетоксичных промышленных и твердых бытовых отходов, буровых шламов, а также нефтезагрязненного снега. Срок эксплуатации полигона рассчитан на 20 лет. Нефте содержащие отходы собираются в нефтешламовом амбаре и по мере накопления перерабатываются на мобильной установке канадской фирмы «Swaco». Учитывая, что полигон промышленных и бытовых твердых отходов на Верх-Тарском нефтепромысле является потенциальным источником загрязнения компонентов природной среды, как на стадии его эксплуатации, так и в последующий пострекультивационный период, в этом районе заложены шесть наблюдательных скважин, оборудованных на грунтовый водоносный горизонт. Величина pH, общая жесткость, окисляемость перманганатная, содержание аммония, нитритов, нитратов, хлоридов, сульфатов, кадмия, никеля, алюминия и фенольного индекса в грунтовых водах по данным опробования не превысили нормативных значений, регламентируемых СанПиН 2.1.4.1074-01 и ГН 2.1.5.1315-03. В пробах обнаружены повышенное содержание марганца (до 0,39 мг/дм³; до 3,9 ПДК) и железа (до 15 мг/дм³; до 50 ПДК). Высокое содержание в грунтовых водах марганца и железа относительно ПДК объясняется природными факторами: вещественным составом водовмещающих пород, высоким содержанием органики в перекрывающей осадочной толще. Среди загрязняющих компонентов техногенного происхождения в запредельных концентрациях в грунтовых водах выявлены свинец (до 0,019 мг/дм³; до 1,9 ПДК) и нефтепродукты (до 0,163 мг/дм³; до 1,6 ПДК).

Развитие нефтедобычи в большинстве случаев связано с загрязнением тех водоносных горизонтов, которые наиболее перспективны для централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения прилегаю-

щих населенных пунктов. Превышение нефтепродуктов ($0,105—0,117 \text{ мг/дм}^3$; $1,05—1,17 \text{ ПДК}$) в пробах воды, отобранных из водозаборных скважин, на разбуриваемых кустовых площадках указывает на техногенное загрязнение ввиду низкой природной защищенности нижнесреднемиоценовых тонкомелкозернистых водоносных песков бещеульской свиты — малой мощностью перекрывающей глинистой водопорной толщи четвертичного возраста [5].

Одним из распространенных источников химического загрязнения территории нефтяного месторождения традиционно являются шламовые амбары-накопители, заполняемые отходами бурения. Загрязнение, как правило, происходит в результате разрушения обвалования и разливов содержимого, а также в процессе боковой фильтрации растворов при отсутствии надежной гидроизоляции дна и стенок шламонакопителя. Результаты обследования, выполненного в 2005 г., выявили на территории Малоичского месторождения нерекультивированный шламовый амбар в районе ЦПС как объект загрязнения природной среды. В марте 2006 г. недропользователи ликвидировали техногенный загрязнитель путем засыпки. Опробование компонентов природной среды в рамках локального мониторинга в 2009 г. позволило проследить масштабы загрязнения, вызванные шламонакопителем в районе ЦПС после его ликвидации. Пробы поверхностных вод отбирались из мочажин озерно-болотного комплекса за пределами амбара. Во всех пунктах наблюдений отмечены повышенные концентрации марганца ($0,11—0,989 \text{ мг/дм}^3$; $11—99 \text{ ПДК}_{\text{рыб}}$) и нефтепродуктов ($0,100—0,450 \text{ мг/дм}^3$; $2—9 \text{ ПДК}_{\text{рыб}}$). Максимальные их величины обнаружены в поверхностных водах заболоченных понижений, расположенных в 20 м на СЗ и в 50 м на ЮЗ от амбара. Высокие величины нефтепродуктов в пробах вод свидетельствуют о проникновении со стороны амбара органических загрязнителей. Последние, вероятно, способствовали накоплению в водах вторичного загрязняющего элемента — марганца, значение которого заметно превышает фоновое (менее $0,5 \text{ мг/дм}^3$), характерное для рассматриваемого региона. Из верхней части разреза (зоны аэрации) в зондировочных скважинах, пробуренных на горизонт грунтовых вод, был произведен отбор проб почвогрунтов зоны аэрации с глубин 0,25 и 0,5 м. Величина pH, содержание в почвогрунтах хлоридов, нитратов, фосфатов, свинца, железа находятся в пределах нормы относительно ПДК или их естественных колебаний. Все опробованные почвогрунты загрязнены нефтепродуктами в умеренных концентрациях — $2,10—2,78 \text{ г/кг}$ [4]. Максимальная их концентрация обнаружена на глубине 0,25 м в 10 м от ликвидированного амбара. Из анализа проведенных ис-

следований следует, что в почвогрунтах выше нормы зафиксирован цинк (до 78,8 мг/кг; до 1,1 ПДК). Среди токсичных элементов в запрещенных концентрациях на расстоянии 10 м от амбара обнаружен никель на глубинах 0,25 и 0,50 м — 53,6 мг/кг (1,1 ПДК) и 51,5 мг/кг (1,03 ПДК) соответственно. Значительные концентрации нефтепродуктов до 0,672 мг/дм³ (до 6,7 ПДК) в грунтовых водах в ~10 м на запад от амбара позволяют выделить органическое загрязнение техногенного происхождения. Косвенным показателем загрязнения подземных вод служит повышенное содержание аммония на данном участке опробования — до 2,60 мг/дм³ (до 1,7 ПДК). Площадь с максимальными величинами марганца до 0,775 мг/дм³ (до 7,75 ПДК) также тяготеет к амбару в связи с техногенным загрязнением. Повышенные концентрации нефтепродуктов в грунтовых и поверхностных водах, почвогрунтах зоны аэрации и илисто-глинистых донных отложениях мочажин на участках, примыкающих к шламонакопителю, дают основания для заключения, что засыпка не устранила амбар как источник загрязнения. Для рекультивации необходимы специальные технологии с внесением биологических культур.

Проведенные мониторинговые исследования в 2010 г. показали, что относительно предыдущих лет существенных изменений в качественном составе опробованных компонентов не произошло. Присутствуют аналогичные природные и техногенные загрязняющие компоненты с близкими концентрациями. В целом загрязнение окружающей среды на рассматриваемых углеводородных месторождениях носит «пульсирующий» характер, но при этом тенденции прогрессирующего загрязнения не отмечаются. Для организации дальнейшего ведения системы наблюдений за компонентами природной среды на территориях нефтепромыслов и предупреждения критических ситуаций ГУ «СибНИГМИ» разработаны рекомендации, основанные на ранее проведенных исследованиях.

Литература

1. *Геологическое строение и полезные ископаемые Западной Сибири*. Т. 2. Полезные ископаемые / Научн. ред. А.В. Росляков, В.Г. Свиридов и др. Новосибирск: НИИ ОИГГМ, 1998. 254 с.
2. *Волков И.А., Казьмин С.П.* Основные черты геолого-геоморфологической основы ландшафтов Новосибирской области // *Геология и геофизика*. 1996. Т. 37, № 2. С. 75—85.
3. *Требования к геолого-экологическим исследованиям и картографированию* масштаба 1 : 50 000 — 1 : 25 000. М.: ВСЕГИНГЕО, 1990. 127 с.

4. *Методические* рекомендации по выявлению, обследованию, паспортизации и оценке экологической опасности очагов загрязнения геологической среды нефтепродуктами. М.: МПР РФ, ГИДЭК, 2002. 48 с.
5. *Маркеев В.Е.* Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Серия Западно-Сибирская. Листы О-43-XXIX (Верх. Майзас), О-43-XXX (Крутиха), О-43-XXV (Шерстобитово). Объяснительная записка. М.: МПР РФ, 1998. 113 с. + 4 вкл.

**О РАЗВИТИИ В ГУ «СИБНИГМИ» ПРИКЛАДНОГО
ДИНАМИКО-СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ДЛЯ АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ЗЕМЛЕДЕЛИЯ УРАЛО-СИБИРСКОГО РЕГИОНА**

В.В. Набока

*ГУ «Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт», г. Новосибирск*

Территория сельскохозяйственного освоения Урало-Сибирского региона расположена в так называемой зоне рискованного земледелия. Степень рисков в отдельных ее частях характеризуется комплексом факторов негативного воздействия природной среды, их интенсивностью и продолжительностью воздействия на совокупность физиологических процессов сельскохозяйственных культур, определяющих урожай.

В этой связи агрометеорологическая оценка условий формирования урожая в течение вегетационного периода и прогнозы урожайности основных сельскохозяйственных культур приобретают существенную важность для принятия хозяйственных и административных мер по обеспечению продовольственной безопасности региона.

Уровень достоверности оценок всего комплекса сложившихся и ожидаемых погодных условий на любой момент вегетационного периода и успешность прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур зависят от полноты и объективности учета комплекса факторов внешней среды, влияющих на продуктивность растений.

В сложившейся практике агрометеорологического обеспечения для оценки условий формирования урожая основных сельскохозяйственных культур специалистами оперативных подразделений Росгидромета применяются преимущественно качественные характеристики на основе анализа данных наблюдательной сети станций по общепринятым критериям. Такая оценка существенно зависит от квалификации и опыта работы специалистов.

При составлении агрометеорологических прогнозов урожайности в пределах отдельных субъектов региона используются методы, большинство которых основаны на физико-статистических моделях — регрессионных уравнениях связи продуктивности сельскохозяйственных культур и ряда основных параметров внешней среды, характеризующих

условия ее формирования. Эти исследования имеют большую прикладную ценность. Однако учет всего комплекса наблюдаемых факторов, определяющих урожай в регрессионных моделях, практически невозможен в силу известных свойств и существующих ограничений в применении методов математической статистики.

Новые условия хозяйствования, сложившиеся с 90-х годов прошлого века, повлекли за собой как смещение структуры посевных площадей, преимущественно в частный сектор производства, так и изменение относительной однородности агротехнических приемов и экономических условий возделывания. За последние 10—15 лет существенно снизилась освещенность территории данными агрометеорологических наблюдений вследствие сокращения не только наблюдательной сети, но и объемов агрометеорологических наблюдений на сохраненных станциях [1].

Все это требует создания новых информационно-прогностических методов, в которых, в частности, недостаточная освещенность территории данными агрометеорологических наблюдений могла бы в определенной степени компенсироваться более детальным учетом метеорологических условий вегетационного периода.

Успешное развитие разработок в области динамического моделирования продукционного процесса растительного покрова во второй половине двадцатого столетия открыли возможности более полного учета всего комплекса наблюдаемых факторов, влияющих на урожай [2].

Революционному скачку в развитии методов агрометеорологических расчетов и прогнозов в системе отечественной гидрометеорологической службы в 70-х годах способствовало создание ведущими учеными ГУ «ВНИИСХМ» теоретической базы и прикладных динамических моделей формирования урожая сельскохозяйственных культур, разработанных специально с целью совершенствования агрометеорологического обеспечения земледелия [3, 4]. Они аккумулировали в себе все существующие на тот момент научные знания о взаимосвязях и о взаимообусловленности сложнейшей природной системы «почва — растение — атмосфера», являющейся предметом изучения агрометеорологии. Необходимыми предпосылками создания динамических моделей агроценозов стали достижения биофизики, экологии, физики сред обитания растений, разработанные модели важнейших процессов, происходящих в растительном покрове, — фотосинтеза, дыхания, водопотребления, минерального питания процессов энерго- и массообмена, а также вычислительной техники. Динамические модели в агрометеорологии рассматриваются как неотъемлемая часть создаваемой автоматизиро-

ванной системы гидрометеорологического обеспечения сельскохозяйственного производства.

Для практической агрометеорологии динамические модели открывают возможность наиболее полного учета наблюдаемого сетью гидрометеорологических станций комплекса факторов внешней среды, влияющих на продукционный процесс растений. Кроме того, с помощью хорошо обусловленных динамических моделей, адаптированных для конкретных культур и природно-климатических условий их возделывания, при любых реально заданных условиях периода вегетации можно рассчитать характеристики продуктивности посевов и комплексные показатели условий ее формирования на любой момент, в зависимости от шага модели по времени. Таким образом, используя заданные необходимым образом сценарии агрометеорологических условий, динамические модели позволяют дать объективную сравнительную количественную оценку как всего комплекса факторов, так и отдельных его элементов, за любой отрезок и за весь вегетационный период относительно выбранного эталона.

Опыт практического применения и развития прикладного динамико-статистического моделирования для условий подведомственного региона в ГУ «СибНИГМИ» связан с освоением в качестве базового средства расчета необходимых параметров и характеристик посевов динамико-статистической модели продукционного процесса агроценоза «Погода — Урожай» с суточным разрешением, разработанной коллективом авторов ГУ «ВНИИСХМ» под руководством О.Д. Сиротенко [5, 6]. Выбор модели высокого разрешения для условий резко-континентального климата рассматриваемого региона с коротким вегетационным периодом наиболее приемлем. Применяя модель меньшей детализации по времени, сложно учесть влияние на рост и развитие растений часто наблюдаемых в регионе значительных амплитуд колебаний величин метеорологических параметров за короткие временные отрезки.

Работы с динамическими моделями для целей практической агрометеорологии в ГУ «СибНИГМИ» начались в конце 70-х годов прошлого века с испытания одной из первых прикладных моделей продукционного процесса с суточным разрешением, базирующейся на универсальной модели агроценоза «Погода — Урожай». Модель предназначалась для расчета комплексной количественной оценки агрометеорологических условий формирования урожая ярового ячменя относительно среднего многолетнего эталона и испытывалась по территории Новосибирской области. Методология расчета такой оценки дана в [7].

Динамическая модель формирования урожая этого класса представляет собой систему дифференциальных уравнений, описывающих

изменение во времени состояния внешней среды и связанные с ним изменения состояния растений, начиная от даты всходов. Она позволяет рассчитать при любых реально заданных до конца вегетации метеорологических условиях на каждые сутки вегетационного периода следующие характеристики посева и среды его обитания:

- биомассу отдельных органов: листьев, стеблей, корней, запасающих органов (колосья, клубни и т. п.), ц/га;

- относительную площадь листьев (листовой индекс);

- влагосодержание отдельных слоев почвы, мм;

в том числе нарастающим итогом от даты всходов:

- сумму эффективных температур воздуха, °С;

- сумму осадков, мм;

- транспирацию, мм;

- испарение с поверхности почвы, мм;

Совокупность входных данных модели составляют:

- константы времени и места: широта пункта, календарное время суток, отсчитываемое от 21 марта до даты всходов включительно, биологическое время в виде суммы эффективных температур воздуха от даты всходов до начала расчетного периода;

- водно-физические свойства почвы: полная влагоемкость, влажность завядания, наименьшая полевая влагоемкость по 10-сантиметровым слоям корнеобитаемой зоны;

- начальное состояние растительного покрова и почвы: исходные биомассы листьев, стеблей, корней, запасающих органов, исходные влагозапасы почвы по 10-сантиметровым слоям;

- метеорологические данные: средняя суточная температура воздуха, число часов солнечного сияния, суточная сумма осадков, средний суточный дефицит влажности воздуха.

Для корректировки ряда параметров модели, ее привязки к местным сортам и природно-климатическим условиям в 1979—1980 гг. были проведены специальные полевые экспериментальные наблюдения по динамике биомассы отдельных органов ярового ячменя на агрометеорологической станции Огурцово. Методика расчета комплексной количественной оценки агрометеорологических условий формирования урожая ярового ячменя после успешных испытаний передана в отдел агрометеорологических прогнозов ЗСУГМС.

Параллельно испытаниям проводились работы по созданию информационного обеспечения и разработке прикладной динамической модели продукционного процесса картофеля для условий Западной Сибири на той же базовой модели агроценоза «Погода — Урожай». В во-

просе моделирования продукционного процесса культура картофеля представляла интерес и тем, что в отличие от злаков хозяйственно-ценный орган формируется не репродуктивным, а вегетативным путем. Для создания прикладной динамической модели продукционного процесса картофеля применительно к условиям Западной Сибири надо было решить задачу оценки параметров модели на конкретном экспериментальном материале. Значения определенной части параметров модели для картофеля позаимствованы из литературных источников или непосредственно определялись для конкретного расчета. Целый ряд параметров оценен на основании экспериментальных данных путем решения задач оптимизации. Он включает в себя параметры биологических функций (ростовые отдельных органов, потерь биомассы, в том числе перераспределения ассимилянтов, пожелтения листьев, поверхностной плотности листьев, распределения корней в почве, потока «материнский клубень — наземная часть растений»), параметры блока расчета влажности почвы (кардинальное значение гидравлической проводимости насыщенной почвы, коэффициент, определяющий эффективную увлажненность почвы при обильных осадках), параметры, ответственные за расчет фотосинтеза (угол наклона световой кривой фотосинтеза, константа для расчета устьичного сопротивления потоку углекислого газа).

В 1976—1978 гг. на агрометеорологических станциях Огурцово и Кемерово проведены полевые экспериментальные наблюдения при участии и по программе, разработанной автором данной статьи. На станциях Славгорода и в отделе наблюдений АЗГМО наблюдения проводились по сокращенной программе. Автор выражает искреннюю благодарность всем сотрудникам названных станций, принимавшим участие в экспериментальных наблюдениях, за добросовестно выполненные сложные виды работ. Были получены необходимые данные для идентификации параметров динамической модели «Погода — Урожай» по картофелю применительно к условиям юго-востока Западной Сибири. Программа наблюдений охватывала весь период вегетации и содержала помимо стандартных агрометеорологических учтенные (каждые пять дней) биометрические наблюдения и анализ растительной массы. Исследовалась динамика глубины проникновения корневой системы, площади фотосинтезирующего аппарата, веса сырой и абсолютно сухой биомассы отдельных органов растений, естественных и причинных потерь биомассы. Сопряженные стандартные наблюдения включали фенологию, инструментальное определение влажности почвы, регистрацию среднесуточных величин основных метеорологических элементов, данных полевых дождемеров и почвенных термометров-щупов.

Оценка параметров модели производилась по методике [8]. Для решения задач оптимизации использовался алгоритм Розенброка и программы для ЕС ЭВМ, заимствованные в ГУ «ВНИИСХМ». Применение методов статистического анализа для идентификации параметров динамических моделей агроценозов дает уточнение названию класса моделей — «динамико-статистические». (Далее для краткости слово «статистические» опускается.)

Достигнутый уровень адекватности динамической модели формирования урожая картофеля [9] и доступность необходимого информационного обеспечения расчетов позволили в последующие годы рассматривать ее в качестве средства агрометеорологических расчетов оперативного и справочного назначения.

В [10] на примере практического применения по Новосибирской области показаны результаты сравнения при помощи данной модели вклада в конечный урожай всего комплекса сложившихся агрометеорологических условий формирования урожая картофеля за разные периоды вегетации и отдельных элементов этого комплекса (например, влагозапасов на дату всходов) относительно средних многолетних эталонных условий. Там же представлены итоги численных экспериментов на модели по оценке эффективности поливов картофеля в зависимости от нормы и времени их проведения в течение вегетации.

В следующей серии численных экспериментов на модели оценены возможные изменения продуктивности картофеля по данной территории в связи с вероятными изменениями климатических условий по одному из сценариев ГГО [11]. Полученные в результате расчетов на модели выводы не противоречат априорным представлениям о реакции растений картофеля на заданные изменения условий произрастания и свидетельствуют о перспективности практического применения динамических моделей такого типа для агрометеорологических расчетов.

В начале 90-х годов прошедшего столетия по заказу Уральского УГМС разрабатывался способ интерпретации с помощью динамической модели содержания средне- и долгосрочных прогнозов погоды на предстоящую неделю в виде агрометеорологических параметров, характеризующих ожидаемые условия формирования урожая картофеля и их комплексной оценки, относительно прошлого года.

Анализу результатов адаптации динамической модели формирования урожая картофеля для сельскохозяйственной зоны Урала (в границах Пермской и Свердловской областей) и возможным путям решения поставленных задач посвящена статья [12]. В этой работе адаптация модели выполнена методом итерационного подбора оптимальных зна-

чений параметров, которые, по оценке автора базовой модели [3], наиболее сильно влияют на расчет текущих значений биомассы и влажности почвы. Модель адаптирована для двух уровней осреднения характеристик продуктивности — средней районной урожайности и средней биологической продуктивности, определяемой по приросту клубней перед уборкой. Лучший результат получен по согласованию расчетных и наблюдаемых величин биологической продуктивности по теплomu незначительно засушливому агроклиматическому району — коэффициенты корреляции за 20-летний период наблюдений по отдельным декадам колеблются в пределах 0,48—0,62. В целом по рассматриваемой территории за тот же период получен высокий уровень корреляции (0,60—0,80) рассчитанных и фактических значений общего увлажнения корнеобитаемого слоя почвы. В Уральское УГМС переданы рекомендации, в которых изложена технология расчета ожидаемых величин агрометеорологических параметров условий формирования урожая картофеля и их комплексной количественной оценки на основе прогноза погоды, включая особенности формирования входного потока информации для этих целей.

В последующие годы в ГУ «СибНИГМИ» разрабатывалась методология применения рассмотренных динамических моделей формирования урожая в качестве средства расчетов при прогнозировании урожайности сельскохозяйственных культур. Первые результаты практического использования динамической модели формирования урожая картофеля с суточным разрешением для целей агрометеорологического прогнозирования средней урожайности картофеля по территории Новосибирской области и Красноярского края обсуждаются в [13]. В этой работе предварительная адаптация модели выполнена также для расчетов на двух уровнях продуктивности картофеля — биологической продуктивности (версия модели «Прирост») и фактической урожайности по всем категориям хозяйств (версии модели «Урожай»). Методом итерационного подбора получены оптимальные величины параметров, наиболее сильно влияющих на расчет текущих значений биомассы и влажности почвы. Решалась задача максимального пошагового приближения рассчитанных при помощи модели и фактически наблюдаемых на конец вегетации величин показателей продуктивности картофеля и соответствующих величин запасов продуктивной влаги в почве. Достигнутая степень согласования рассчитанных и фактических средних величин рассмотренных характеристик представлена в таблице.

Результаты верификации моделей, выполненной на материалах независимых наблюдений, показаны на рис. 1 и 2.

В ходе разработки метода и технологии расчета ожидаемой урожайности картофеля на уровне всех категорий хозяйств отработано несколько вариантов использования полученных версий динамической модели. В первых двух вариантах, применяя обе версии модели для расчета ожидаемой величины урожайности, использован модельный расчет комплексной количественной оценки агрометеорологических условий формирования урожая картофеля, сложившихся на момент составления прогноза, при котором в качестве эталона выступают реальные условия аналогичного периода прошлого года.

Теснота согласования рассчитанных и фактических средних величин продуктивности картофеля и увлажнения почвы перед уборкой

Показатель	Коэффициент корреляции	
	<i>R</i>	<i>r</i> _{знач}
ВЕРСИЯ МОДЕЛИ «ПРИРОСТ»		
Новосибирская область		
Биологическая продуктивность картофеля перед уборкой	0,704	0,396
Влагозапасы почвы перед уборкой в слоях:		
0—20 см	0,381	0,456
0—50 см	0,556	0,456
Красноярский край		
Биологическая продуктивность картофеля перед уборкой	0,320	0,388
Влагозапасы почвы перед уборкой в слоях:		
0—20 см	0,347	0,396
0—50 см	0,516	0,396
ВЕРСИЯ МОДЕЛИ «УРОЖАЙ»		
Новосибирская область		
Урожайность картофеля по всем категориям хозяйств	0,533	0,396
Влагозапасы почвы перед уборкой в слоях:		
0—20 см	0,143	0,404
0—50 см	0,205	0,404
Красноярский край		
Урожайность картофеля по всем категориям хозяйств	0,566	0,388
Влагозапасы почвы перед уборкой в слоях:		
0—20 см	0,502	0,388
0—50 см	0,514	0,388

Оценка условий формирования урожая относительно прошлого года на качественном уровне наряду со средними многолетними является наиболее часто применяемой в практической агрометеорологии. Использование в качестве эталонных условий прошлого года удобно и с точки зрения технологии подготовки данных. Кроме того, отсутствие значимого тренда урожайности по рассматриваемым территориям затрудняет применение в качестве эталонных условий традиционных климатических норм и разработку технологии прогноза урожайности по

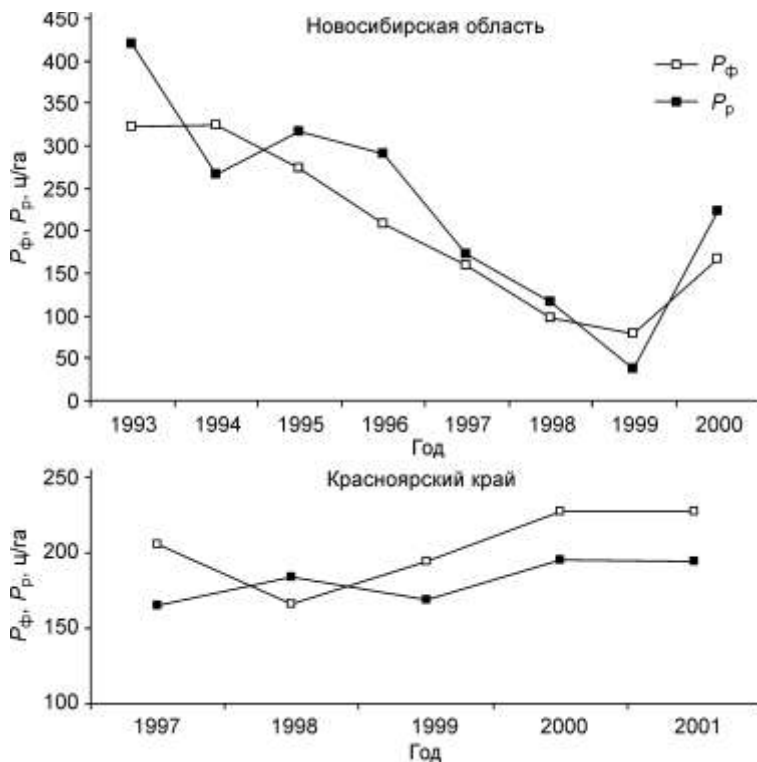


Рис. 1. Сравнение рассчитанной (P_p) и фактической (P_{ϕ}) средней биологической продуктивности картофеля по независимым данным

методологии, предложенной в [4]. Кроме того, доказано [3, 14], что использование в динамической модели в качестве исходных данных климатических норм вызывает методическую ошибку — существенное повышение рассчитанных значений урожайности. В случае применения моделей высокой разрешающей способности сценарий «средние многолетние» нереален, ему нет аналогов в природных условиях.

Оценки, рассчитанные при помощи версии модели «Прирост», универсальны. Они применимы для любой статистической категории урожайности и наиболее объективны для характеристики именно комплекса агрометеорологических условий формирования урожая картофеля в динамике вегетационного периода при определенном уровне культуры земледелия. К сожалению, в настоящее время наблюдения за приростом картофеля на гидрометеорологических станциях редки, и те по

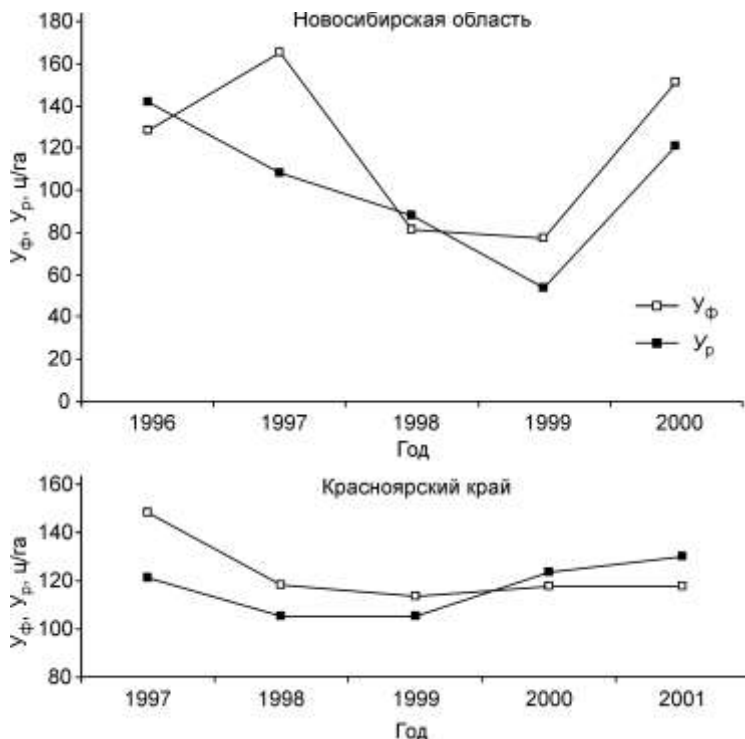


Рис. 2. Сравнение рассчитанной (Y_p) и фактической (Y_{ϕ}) средней урожайности картофеля по независимым данным

большей части производятся по сокращенной программе, так как переместились на частные огороды. В этом случае будет затруднительно создать репрезентативную базу данных для необходимой корректировки модели в процессе ее эксплуатации.

Версия модели «Урожай» опосредованно учитывает условия уборки культуры, исходя из того, что средняя урожайность, на расчет которой настроена модель, является интегральным показателем как агрометеорологических, так и хозяйственных условий возделывания и в большей степени зависит от качества уборки.

В последующих двух вариантах применения динамической модели продукционного процесса картофеля для целей прогнозирования урожайности использована версия модели «Урожай». В этих вариантах применен прием построения сценариев будущих метеорологических условий от даты составления прогноза до конца вегетации: инерцион-

ный прогноз метеоэлементов в виде фактических данных наблюдений за аналогичный период прошлого года или в виде фактических данных года-аналога по долгосрочному прогнозу погоды на предстоящий месяц, пролонгированного до условного окончания вегетационного периода.

Представленные методы прогнозов реализованы на персональном компьютере.

По результатам оперативных испытаний метод прогноза урожайности картофеля по Новосибирской области с 2003 г. утвержден в качестве основного расчетного метода для оперативного применения, по Красноярскому краю — с 2006 г. в качестве вспомогательного.

Аналогичный подход апробирован при разработке методов оценки условий формирования урожая и прогноза средней урожайности основной зерновой культуры региона — яровой пшеницы — по территории Томской, Новосибирской, Кемеровской областей и Алтайского края. В качестве базового средства расчета необходимых параметров и характеристик в представленной работе применен один из вариантов динамико-статистической модели продукционного процесса яровых злаковых культур «Погода—Урожай» с суточным разрешением [15]. Адекватное модельное отражение влияния изменений условий внешней среды на продукционный процесс яровой пшеницы в природно-климатических условиях юго-восточной части Западной Сибири достигнуто путем адаптации базовой модели на материалах агрометеорологических наблюдений и данных статистических управлений по каждому субъекту исследуемой территории.

Согласование рассчитанных и фактических величин средней урожайности по рассматриваемым субъектам региона за период 1971—2000 гг. характеризуется коэффициентами корреляции в пределах 0,51—0,69, а запасов влаги в метровом слое почвы по станциям на конец вегетации — 0,41—0,51, при значимой величине на 5%-м уровне значимости, равной 0,36. Средняя относительная ошибка расчета средней урожайности по независимым данным 2001—2005 гг. составляет от 5,0 до 15,8 %, а обеспеченность расчетов с ошибкой менее 20 % — 80—100 %.

Для расчета при помощи динамико-статистической модели комплексной количественной оценки сложившихся агрометеорологических условий формирования урожая яровой пшеницы за определенный отрезок периода вегетации в качестве эталона приняты условия прошлого года.

Согласно [15], рассматривая урожай в качестве интегральной характеристики агрометеорологических условий вегетационного периода, мерой отличия оцениваемых условий текущей вегетации от прошлогод-

них будет отношение (η_p) конечных урожаев, рассчитанных по условиям текущего (Y_o) и прошлого (Y_p) года за оцениваемый период:

$$\eta_p = \frac{Y_o}{Y_p} 100 \%. \quad (1)$$

Следовательно, чтобы дать количественную оценку агрометеорологических условий формирования урожая яровой пшеницы, например, по состоянию на 20 июля текущего года относительно условий прошлого года, необходимо рассчитать отношение (1), где Y_o — урожай, рассчитанный по фактическим данным текущего года от всходов до 20 июля и данным прошлого года от 21 июля до конца вегетации; Y_p — урожай, рассчитанный полностью по данным прошлого года.

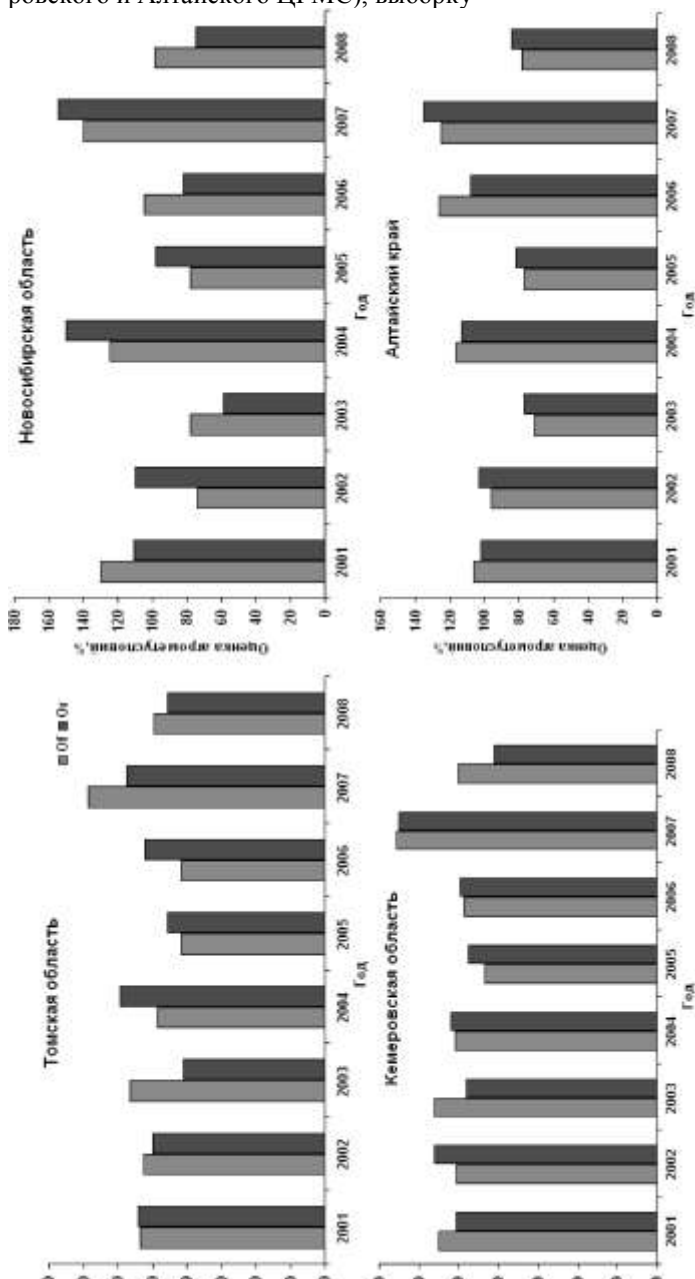
На рис. 3 показано сравнение рассчитанных и фактических величин комплексной количественной оценки агрометеорологических условий формирования урожая яровой пшеницы за полный вегетационный период относительно условий прошлого года по независимым данным, включая годы авторских и оперативных испытаний.

Для расчета прогнозов урожайности яровой пшеницы на основе динамико-статистической модели «Погода — Урожай» путем статистического анализа подобраны наиболее показательные варианты сценариев ожидаемых метеорологических условий от даты составления прогноза до конца вегетации. Для Томской, Новосибирской, Кемеровской областей — это пролонгированный до конца вегетации сценарий года-аналога по долгосрочному прогнозу погоды на июль для предварительного прогноза урожайности и на август — для уточненного. По Алтайскому краю рекомендован сценарий инерционного прогноза метеорологических условий по прошлому году.

На рис. 4 представлено сравнение фактических величин и ожидаемой средней урожайности яровой пшеницы по методическому (предварительному и уточненному), инерционному и климатологическому прогнозам по независимым данным за годы авторских и производственных испытаний.

Результаты испытаний методов оценки условий формирования урожая и прогноза средней урожайности яровой пшеницы по территории Томской, Новосибирской, Кемеровской областей и Алтайского края опубликованы в [16].

Представленные методы полностью автоматизированы. Технологическая линия включает выборку текущей информации из ГИС МЕТЕО (БД АСОАМИ для Новосибирского ГМЦ) и из электронной версии ТСХ-1 (для Томского, Кемеровского и Алтайского ЦГМС), выборку



3. Сравнение рассчитанных (O_r) и фактических (O_f) величин комплексной количественной оценки агрометеорологических условий формирования урожая яровой пшеницы за полный вегетационный период относительно условий прошлого года.

2001—2005 гг. — авторские испытания; 2006—2008 гг. — оперативные испытания

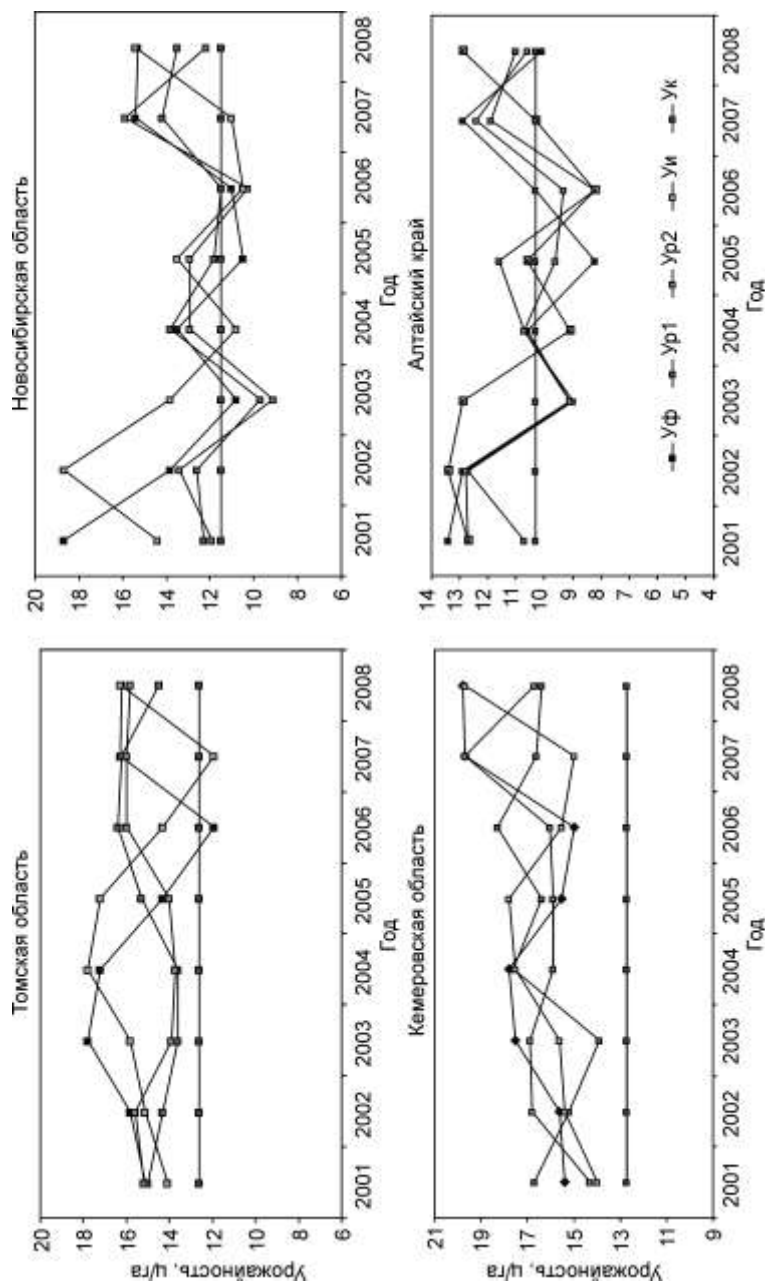


Рис. 4. Сравнение величин ожидаемой урожайности яровой пшеницы по методическому (предварительный — U_{p1} , уточненный — U_{p2}), инерционному (U_n) и климатологическому (U_k) прогнозам с фактической (U_n)

данных по прогнозируемым годам-аналогам из специализированного, автоматически пополняемого каталога, составление РНД, расчет оценок сложившихся условий формирования урожая и прогнозов урожайности на заданную дату.

По результатам испытаний Технический совет ГУ «Новосибирский ЦГМС-РСМЦ» в сентябре 2009 г. постановил рекомендовать новые методы к внедрению в качестве основных расчетных методов по всей территории Западно-Сибирского УГМС.

В настоящее время в ГУ «СибНИГМИ» на основе динамико-статистического моделирования заканчивается разработка методов оценки агрометеорологических условий формирования урожая и прогноза урожайности картофеля по территории Томской, Кемеровской областей и Алтайского края. По Новосибирской области после семи лет применения в оперативном режиме метода прогноза урожайности картофеля производится корректировка параметров модели и создаются новая технологическая линия и метод оценки сложившихся условий формирования урожая в режиме реального времени.

Представленная на рис. 5 блок-схема иллюстрирует сложившуюся в ГУ «СибНИГМИ» и реализуемую на практике технологию разработки и внедрения новых методов агрометеорологической оценки условий формирования и прогнозов урожайности сельскохозяйственных культур на основе динамико-статистического подхода.

Приведенные результаты первых опытов применения динамических моделей формирования урожая с суточным разрешением для целей агрометеорологического обеспечения производства сельскохозяйственных культур по субъектам Урало-Сибирского региона показали гибкость и многогранность динамических моделей такого класса, как средства расчетов, перспективность и конкурентоспособность новой методологии прогнозирования. Развитие динамико-статистического направления в агрометеорологии предполагает как совершенствование теоретической базы и соответствующих прикладных моделей, так и расширение информационного обеспечения, что в свою очередь требует современного вычислительного оснащения.

О.Д. Сиротенко [2], освещая трудности и возможные пути совершенствования моделей продуктивности агроценозов, отмечает, что за последние 20 лет нет заметного прогресса в развитии методов расчета большого ряда характеристик процессов, происходящих в растительном покрове и оказывающих существенное влияние на урожай. Надо полагать, что версии базовых динамико-статистических моделей ВНИИСХМ 80—90-х годов и в настоящее время вполне современны. Потенциаль-

ные возможности этих моделей для агрометеорологического обеспечения земледелия в регионе далеко не исчерпаны.



Рис. 5. Блок-схема технологии разработки и внедрения новых методов агрометеорологической оценки условий формирования и прогнозов урожайности сельскохозяйственных культур

Существующие прикладные динамические модели и технологии их применения находятся в процессе дальнейшего совершенствования. Развитие вычислительной и технологической оснащенности областных и краевых центров гидрометеорологической службы региона за последние годы способствует внедрению в практику методов агрометеорологической оценки условий вегетации и прогнозов урожайности на основе динамических моделей.

На сегодня в регионе заметно внедрение новых сортов сельскохозяйственных культур, новой техники и кардинально отличающихся от

принятых ранее технологий обработки почвы и ухода за растениями. Поэтому для надежной работы и дальнейшего развития методов агрометеорологического обеспечения производства сельскохозяйственных культур, и, в частности, разработанных на основе динамико-статистического подхода, необходима их систематическая корректировка. Своевременные рекомендации по этой проблеме были выработаны участниками Международной научно-практической конференции «Агрометеорологическое обеспечение устойчивого развития сельского хозяйства в условиях глобального изменения климата» [17].

Автор статьи выражает глубокую благодарность руководителю отдела математического моделирования ГУ «ВНИИСХМ» Сиротенко Олегу Дмитриевичу, его ведущим сотрудникам Абашиной Елене Владимировне, Павловой Вере Николаевне и всем сотрудникам отдела за полученные знания в области динамического моделирования в агрометеорологии и неоценимую помощь в освоении работ по их применению на практике.

Литература

1. *Страшина А.И.* Состояние и проблемы оперативного агрометеорологического обеспечения сельского хозяйства на федеральном уровне в условиях глобального изменения климата // Труды ВНИИСХМ. 2007. Вып. 36. С. 78—91.
2. *Сиротенко О.Д.* Развитие физико-математических методов исследования в агрометеорологии // Развитие сельскохозяйственной метеорологии в России. Обнинск: ГУ «ВНИГМИ-МЦД», 2009. С. 112—130.
3. *Сиротенко О.Д.* Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 166 с.
4. *Полевой А.Н.* Теория и расчет продуктивности сельскохозяйственных культур. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 175 с.
5. *Сиротенко О.Д., Бойко А.П.* Динамическая модель агроценоза // Труды ИЭМ. 1977. Вып. 8(67). С. 12—36.
6. *Абашина Е.В., Просвиркина А.Г., Сиротенко О.Д.* Упрощенная динамическая модель формирования урожая ярового ячменя // Труды ИЭМ. 1977. Вып. 8(67). С. 54—67.
7. *Сиротенко О.Д., Просвиркина А.Г.* Метод количественной оценки агрометеорологических условий формирования урожая ярового ячменя (для нечерноземной зоны Европейской территории СССР). М.: Гидрометеиздат, 1979. 32 с.
8. *Абашина Е.В., Сиротенко О.Д.* Методика идентификации параметров модели «Погода — Урожай». Обнинск: ВНИИСХМ, 1979. 17 с.
9. *Набока В.В.* Идентификация параметров модели «Погода — Урожай» для культуры картофеля в условиях Западной Сибири // Труды ЗапСибНИГМИ. 1983. Вып. 58. С. 44—54.

10. Набока В.В. Применение динамической модели формирования урожая картофеля для агрометеорологических расчетов // Труды ЗапСибНИГМИ. 1989. Вып. 86. С. 89—97.
11. Винников К.Я., Гройсман П.Я. Эмпирическая модель современных изменений климата // Метеорология и гидрология. 1979. № 3. С. 25—36.
12. Набока В.В. О применении динамической модели для прогнозирования агрометеорологических условий формирования урожая картофеля по территории Урала на основе прогноза погоды // Труды СибНИГМИ. 2000. Вып. 102. С. 106—118.
13. Набока В.В. О применении динамической модели формирования урожая картофеля с суточным разрешением для прогнозирования урожайности в условиях Сибири // Труды СибНИГМИ. 2006. Вып. 105. Сайт ГУ «СибНИГМИ». Актуально 24.06.2010., <http://sibnigmi.ru/cgi-bin/inst/index.pl?4>.
14. Сепп Ю.В., Тооминг Х.Г. Динамическая модель продукционного процесса картофеля и ее применение для решения некоторых агрометеорологических задач. М.: Гидрометеоиздат, 1987. 44 с.
15. Сиротенко О.Д., Абашина Е.В., Павлова В.Н. Динамическая модель ПОГОДА — УРОЖАЙ для яровых зерновых культур и ее использование при оценке агрометеорологических условий формирования урожая в аридной зоне // Труды ВНИИСХМ. 1985. Вып. 10. С. 43—61.
16. Набока В.В., Ковригина И.Г. Результаты испытаний методов оценки условий формирования урожая и прогноза средней урожайности яровой пшеницы по территории Томской, Новосибирской, Кемеровской областей и Алтайского края. Сайт ГУ «Гидрометцентр РФ». Актуально 24.03.2010., <http://method.hydromet.ru>.
17. Решение участников Международной научно-практической конференции «Агрометеорологическое обеспечение устойчивого развития сельского хозяйства в условиях глобального изменения климата». (ГУ «ВНИИСХМ», Росгидромет, г. Обнинск, 9—13 октября 2006 г.) // Труды ВНИИСХМ. 2006. Вып. 36. С. 437—440.

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЛИТЕЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ
АТМОСФЕРЫ И СНЕГОВОГО ПОКРОВА
г. НОВОСИБИРСКА**

В.Ф. Рапута¹, В.В. Коковкин², А.Ю. Девятова³,
В.А. Чирков⁴, О.Е. Казьмин⁴

¹*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск*

²*Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, г. Новосибирск*

³*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск*

⁴*ГУ «Новосибирский региональный центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды с функциями специализированного центра Всемирной службы погоды»*

Введение

Сетевые наблюдения состояния загрязнения атмосферного воздуха в крупнейших городах России проводятся уже более сорока лет. Основные принципы, закладываемые при построении сети наблюдений: регулярность, единство программы наблюдений, репрезентативность мест наблюдений [1—3]. Научной основой организации сети наблюдений стали результаты обширного комплекса теоретических и экспериментальных исследований распространения примесей в атмосфере, а также разработки методов химического анализа состава атмосферного воздуха [1, 4—7]. Установлены три категории постов наблюдений за загрязнением атмосферы: стационарный, маршрутный и подфакельный. Стационарный пост предназначен для обеспечения регулярных измерений в одной точке города из специального павильона, в котором также проводятся наблюдения за метеорологическими величинами, определяющими перенос и рассеивание примесей в атмосфере. Подвижные посты используются достаточно эпизодически для отбора проб воздуха на территории города или под факелами промышленных предприятий. Наблюдения на стационарных и маршрутных постах позволяют восстано-

вить вид распределения концентрации примеси по территории города [1, 4].

Источниками загрязнения атмосферного воздуха г. Новосибирска являются дымовые трубы промышленных предприятий, ТЭЦ, котельных, автомобильный транспорт. К основным загрязняющим примесям следует отнести пыль, сажу, тяжелые металлы, окислы углерода, серы, азота, формальдегид, полиароматические углеводороды (ПАУ). Для оценки уровня загрязнения атмосферы города создана сеть стационарных постов наблюдений. В настоящее время функционирует 10 постов, исходя из расчета один пост на один район города.

Учитывая довольно сложную структуру размещения источников на территории города, этого количества постов явно недостаточно для оценки текущих и длительных полей загрязнения. В этой связи целесообразно использовать в качестве дополнительного источника информации природные планшеты: снеговой, растительный и почвенный покровы [6, 8—15].

Снежный покров является удобным индикатором аэрозольного загрязнения атмосферного воздуха [8, 9, 15]. Изучение пространственного распределения загрязнения в снеге позволяет ответить на многие вопросы: выявить источники выбросов аэрозольных примесей, дифференцировать зоны интенсивности воздействия и дальность распространения, оценить суммарный выброс и характеристики дисперсного состава примеси [8—12, 14]. Особый интерес снежный покров представляет при изучении процессов длительного загрязнения (месяц, сезон).

Целью данной работы является выявление качественных и количественных взаимосвязей между концентрациями определенных примесей на основании сопряженных исследований загрязнения атмосферного воздуха и снегового покрова на постах г. Новосибирска.

Мониторинг загрязнения атмосферы города

В атмосферу г. Новосибирска с выбросами промышленных предприятий и транспорта поступает значительное количество различных вредных веществ. В зависимости от пространственно-временной структуры источников, а также от климатических условий формируется уровень загрязнения атмосферы. Мониторинг атмосферного воздуха г. Новосибирска проводится на стационарных постах Государственной службы наблюдений за состоянием окружающей среды. Схема расположения стационарных пунктов наблюдения за загрязнением (ПНЗ) атмосферного воздуха и среднезимняя роза ветров представлены на рис. 1. Контроль качества атмосферного воздуха проводится по четырем ос-

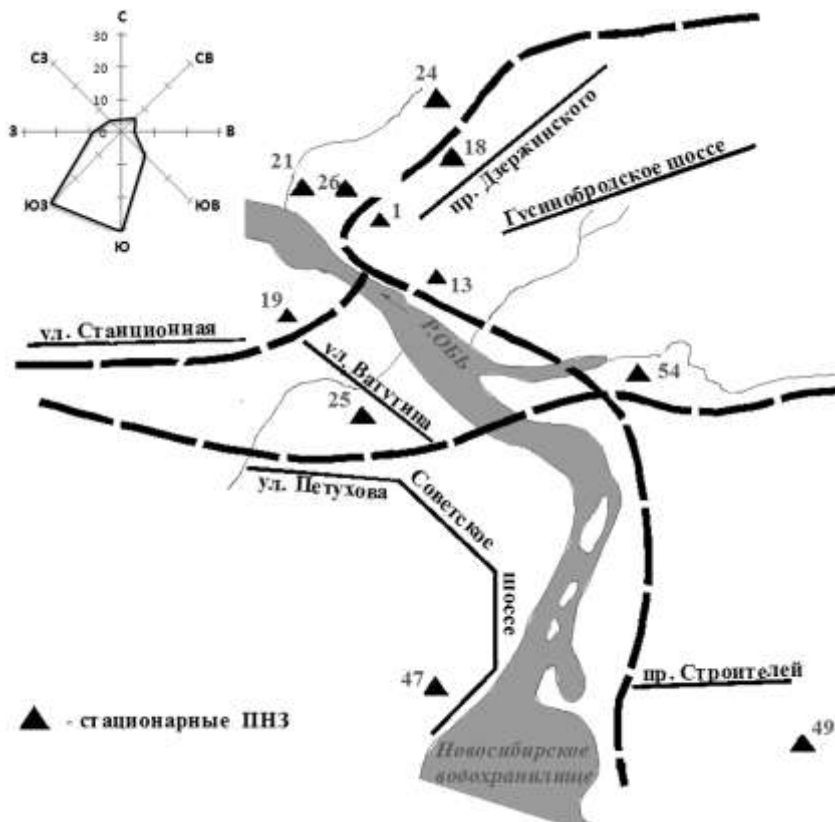


Рис. 1. Схема размещения стационарных ПНЗ на территории г. Новосибирска

новным (взвешенные вещества, диоксиды серы и азота, оксиды азота и углерода) и специфическим (хлористый водород, аммиак, фтористый водород, формальдегид, бенз(а)пирен и др.) примесям. Посты подразделяются на «региональные фоновые» (ПНЗ 47), «городские фоновые» в жилых районах (ПНЗ 24, 26), «промышленные» вблизи предприятий (ПНЗ 18, 19, 25) и «авто» вблизи автомагистралей или в районах с интенсивным движением транспорта (ПНЗ 1, 21, 49, 54). Это деление является в значительной степени условным, так как взаимное размещение жилых районов города, промышленных площадок предприятий, автомагистралей не позволяет сделать четкого разделения.

Для Новосибирска характерно повышенное содержание в воздухе взвешенных веществ. Среднегодовые концентрации пыли за период с

1992 по 2008 г. превышали санитарно-гигиенический норматив в 1,1 — 1,7 раза. Значительное влияние на повышенную запыленность воздуха города оказывают: недостаточная благоустроенность территории, качество дорог, малое количество зеленых насаждений, а также метеорологические условия (скорость ветра, количество и интенсивность атмосферных осадков). Среднемесячные концентрации металлов (кадмий, свинец, ртуть, медь, никель, хром, цинк, железо, марганец) в целом по городу ниже допустимых санитарно-гигиенических нормативов [16].

Основные источники выброса сажи в атмосферу города — это ТЭЦ и котельные, работающие на твердом и жидком топливе; печные трубы частного сектора; автомобильный и железнодорожный транспорт. На протяжении всего периода проведения мониторинга атмосферного воздуха повышенное содержание сажи отмечалось в Первомайском районе (ПНЗ 54) города. Этот район характеризуется большим количеством индивидуальных жилых домов, мелких котельных, асфальтобетонным заводом, крупным железнодорожным узлом. Наблюдения за бенз(а)пиреном проводятся на трех стационарных постах, расположенных в разных районах города (ПНЗ 1, 21, 25). Повышенное содержание бенз(а)пирена в атмосфере отмечается в холодный период года, что связано с увеличением нагрузки на отопительную систему (возрастает количество сжигаемого топлива). Повышенное содержание бенз(а)пирена отмечается на автомагистральных постах, расположенных в Центральном и Залыцовском районах города (ПНЗ 1, 21).

Для атмосферы города характерно повышенное содержание оксидов азота, особенно диоксида азота. Источниками загрязнения атмосферы оксидами азота являются предприятия топливно-энергетического комплекса, котельные, дымовые трубы печей частного сектора, промышленные предприятия, авто- и железнодорожный транспорт. На содержание диоксида азота в приземном слое атмосферного воздуха существенное влияние оказывают метеорологические параметры (температурные инверсии, скорость ветра, наличие туманов). Диоксид серы поступает в атмосферный воздух как с выбросами от стационарных источников, так и с отработанными газами автотранспорта. Больше всего этой примеси содержится в выбросах автотранспорта, работающего на дизельном топливе [16].

При химическом анализе содержания веществ в атмосфере используются методики [3, 5].

Мониторинг загрязнения снежного покрова

Отбор проб снега производился в конце зимних сезонов 2008 и 2009 гг. вблизи стационарных ПНЗ г. Новосибирска. Пробы отбирались с помощью пластмассовой трубы на открытых площадках неповрежденного снежного покрова на всю глубину. Следует отметить, что в городских условиях поиск таких площадок осложнен и не всегда возможен из-за значительной антропогенной нагрузки. В частности, проблемы такого рода возникли вблизи ПНЗ 1, 21, 26, 54. В этом случае площадки для отбора проб смешались до нескольких десятков метров от этих пунктов. Наличие значительных градиентов концентраций измеряемых примесей в окрестностях ПНЗ необходимо учитывать при сравнительном анализе данных наблюдений в снеге и атмосфере.

Анализ снежных проб проводили в лаборатории после их топления по схемам в зависимости от природы определяемых компонентов [17]. Перед определением неорганических компонентов растопленную пробу пропускали через бумажный и мембранный фильтры с диаметрами пор 3—5 и 0,45 мкм соответственно. Анализу подвергали и осадки, и фильтрат. В фильтрате определяли анионный состав, в том числе нитрат-, нитрит- и сульфат-ионы с использованием методики на основе капиллярного электрофореза.

Органические компоненты (ПАУ) определяли после их экстракционного концентрирования в хлористый метилен из всего объема нефильтрованной пробы [17]. Осадок после упаривания на ротационном испарителе растворяли в ацетоне. Полученный раствор анализировали на содержание ПАУ методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим окончанием.

Параметры для сравнения загрязнения атмосферного воздуха и снега

Для прямого сравнения результатов измерений в воздухе и снеге были выбраны соответственно следующие примеси: взвешенные вещества (пыль) и осадок; бенз(а)пирен в обеих средах; сажа воздуха сопоставлялась с бенз(а)пиреном и суммой ПАУ в снеге. К сожалению, бенз(а)пирен в г. Новосибирске измеряется только на трех ПНЗ. Поэтому для расширения объема выборок сравнения в данной работе была использована сажа, содержание которой в атмосфере измеряется на всех ПНЗ и которая является известным индикатором присутствия бенз(а)пирена (ПАУ) в воздухе [18].

Другими неочевидными компонентами примеси для сравнения в рассматриваемых средах нами были выбраны: оксиды азота (NO_2 , NO),

с одной стороны, и нитраты, нитриты, с другой, а также оксид серы(IV) и сульфаты. Из литературных данных известно [8], что оксиды азота и серы являются газовыми предшественниками вышеперечисленных анионов в аэрозольных выпадениях в снег. Расчет среднезимних концентраций примесей, измеряемых в атмосфере, проводился за период времени с середины ноября по середину марта, что примерно соответствует периоду залегания устойчивого снежного покрова в городе [19].

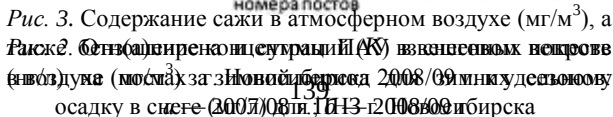
Результаты и их обсуждение

Результаты экспериментальных исследований приводятся в виде диаграмм, на которых по вертикальной оси представлена величина сопоставляемых параметров, на горизонтальной оси указаны порядковые номера ПНЗ. В случаях, когда между сравниваемыми величинами помимо качественного имеется и достаточно близкое количественное согласие, приводятся также диаграммы отношений (K) соответствующих примесей в снеге и воздухе.

Осадок в снеготалой пробе / взвешенные вещества в атмосфере.

На рис. 2 представлена диаграмма отношений концентраций этих примесей по восьми ПНЗ за зимний сезон 2008/09 г. Из диаграммы видно, что разброс отношений (K) довольно значительный и находится в интервале от 0,3 до 1,5 единиц. Максимальное значение K достигается для ПНЗ 21, минимальное — для ПНЗ 47. В случае ПНЗ 47 пониженное значение K может быть обусловлено особым расположением поста. Пост находится на входе в город господствующих в зимнее время ветров [19]. Это приводит к относительно большому присутствию в составе оседающего на снеговой покров аэрозоля мелкодисперсной составляющей примеси. Поэтому здесь возможной причиной занижения отношения K является неполный учет в осадке растворившейся части мелкодисперсной аэрозольной фракции в снеготалой воде.

Сумма ПАУ / сажа; бенз(а)пирен / сажа. На рис. 3 представлены значения концентраций сажи в воздухе, а также суммы ПАУ и бенз(а)пирена в снеге за зимние сезоны 2007/08 г. и 2008/09 г. Из приведенных диаграмм видно качественное согласие в изменении концентраций рассматриваемых примесей от поста к посту. В целом, большим значениям суммы ПАУ и бенз(а)пирена в снеге соответствуют большие



значения сажи в воздухе. Такой характер поведения указывает на возможность использования сажи в качестве индикатора ПАУ не только для воздуха, но и для снега. Как и следовало ожидать, минимальные и максимальные значения этих концентраций достигнуты соответственно на ПНЗ 47 и 54, существенно отличающихся по уровню антропогенной нагрузки. Следует также отметить, что в среднем по постам содержание суммы ПАУ и бенз(а)пирена в снеге для обоих зимних сезонов было примерно одинаковым. Это означает, что структура и мощность источников ПАУ в г. Новосибирске практически не отличались в рассматриваемые периоды времени.

Нитрат-анионы / оксид азота(II, IV); нитрит-анионы / оксид азота(II, IV); сульфат-анионы / оксид серы(IV). Сопоставление изменения концентраций оксидов азота в атмосферном воздухе, а также нитрат- и нитрит-анионов в снеговом покрове на ПНЗ показало вполне

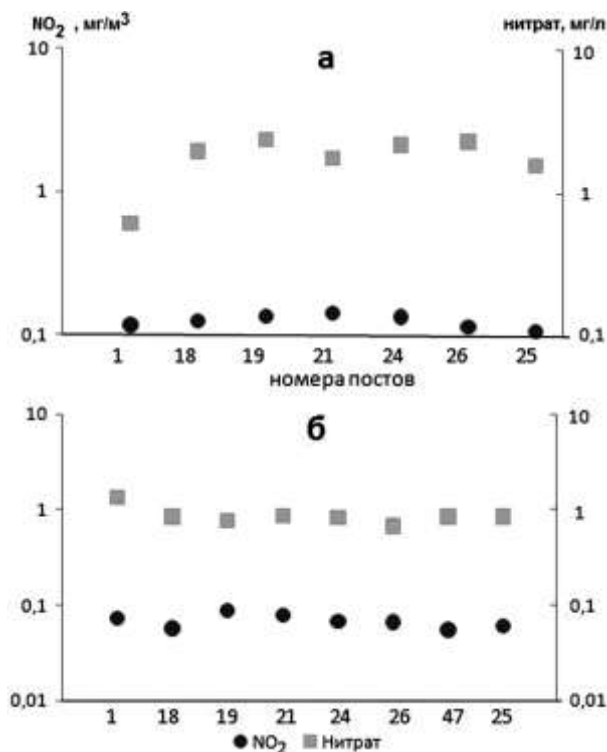


Рис. 4. Содержание NO_2 в атмосферном воздухе (мг/м^3) и нитрат-ионов в снеговом покрове (мг/л) для зимних сезонов: а — 2007/08 г.; б — 2008/09 г.

удовлетворительное согласие для обоих зимних сезонов (рис. 4—6). Исключение составил лишь ПНЗ 1, находящийся в непосредственной близости от автомагистрали, для которого отсутствовали представительные площадки для пробоотбора снега. В этой связи в зимнем сезоне 2007/08 г. отбор проб снега был проведен внутри жилой застройки на значительном удалении от него. В результате концентрация нитрат-ионов в снеге оказалась значительно ниже ожидаемой (см. рис. 4, *а*). С учетом этого обстоятельства в сезоне 2008/09 г. площадка для отбора снега была размещена на том же расстоянии от автомагистрали, что и ПНЗ, но смещена от него на 30 м. В результате значения концентраций нитрат-ионов оказались вполне согласованными (см. рис. 4, *б*).

Совместный анализ рис. 4, 5 показывает, что в зимнем сезоне 2008/09 г. произошло резкое, более чем в 2 раза, уменьшение содержания как оксидов азота(IV) в воздухе, так и нитрат-ионов в снеге по сравнению с сезоном 2007/08 г. На рис. 5 представлена линейная корреляционная зависимость измеряемых параметров в сопоставляемых средах. Коэффициент корреляции составляет 0,77.

На рис. 6 представлены отношения концентраций (*K*) нитрат- и нитрит-ионов к концентрациям оксидов азота в воздухе. Данные по нитрат-ионам получены для обоих зимних сезонов (см. рис. 6, *а*), для нитрит-ионов — для зимнего сезона 2008/09 г. (см. рис. 6, *б*). Из рис. 6, *а* следует, что по большинству постов имеет место достаточно высокая степень количественного согласия представленных параметров. Это

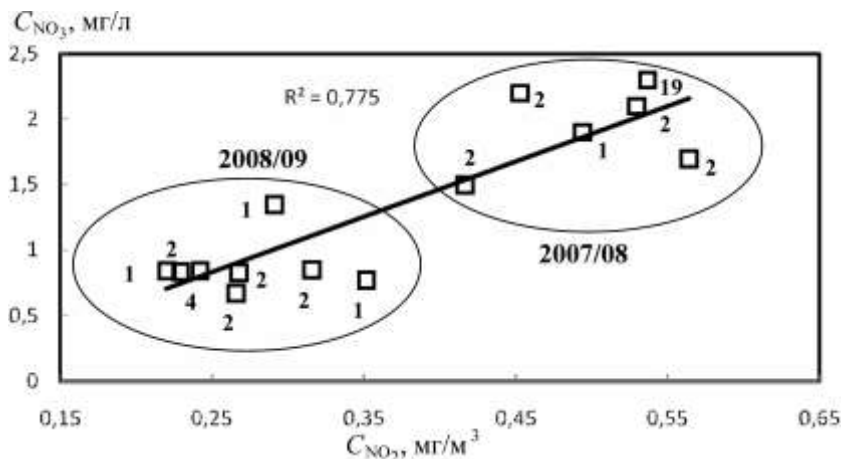


Рис. 5. Сопоставление концентраций нитратов в снеге (мг/л) и NO_2 в атмосферном воздухе (мг/м³) на постах г. Новосибирска для зимних сезонов 2007/08 г. и 2008/09 г.

дает возможность взаимного пересчета данных из одной среды в другую, а также расширения сети наблюдений на территории города в зимнее время. Аналогичная картина наблюдается и для нитрит-ионов (см. рис. 6, б). Однако в данном случае требуется проведение дополнительных исследований вследствие низких концентраций обоих измеряемых параметров, а также относительно небольшой к настоящему времени выборкой данных по ПНЗ.

На рис. 7 приведены результаты измерений концентраций сульфат-ионов в снеге и диоксида серы в атмосфере за зимние сезоны 2007—2009 гг. Несмотря на ограниченные возможности сопоставления измеряемых примесей, полученные результаты показывают определенную

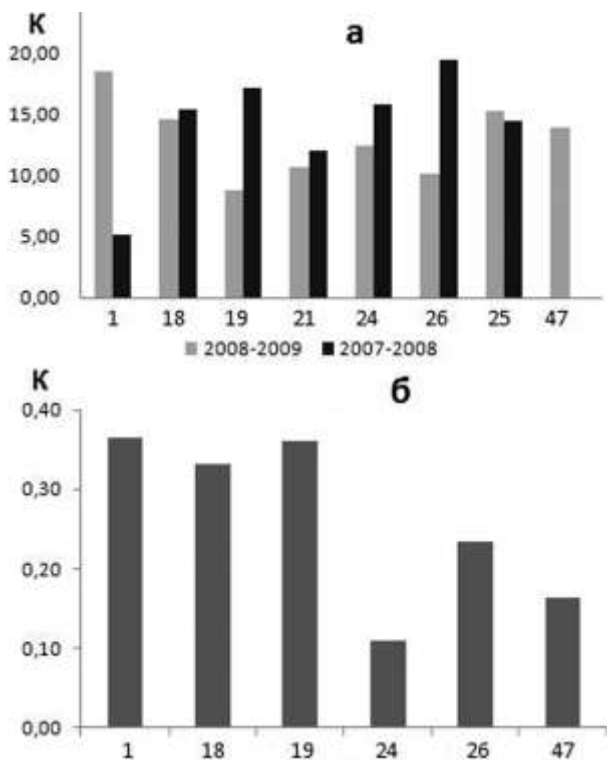


Рис. 6. Отношение концентрации диоксида азота в воздухе (мг/м^3) к концентрации нитрат-ионов в снеге (мг/л) для ПНЗ г. Новосибирска за зимние сезоны 2007—2009 гг. (а) и оксида азота к нитрит-ионам в снеге за зимний период 2008/09 г. (б)

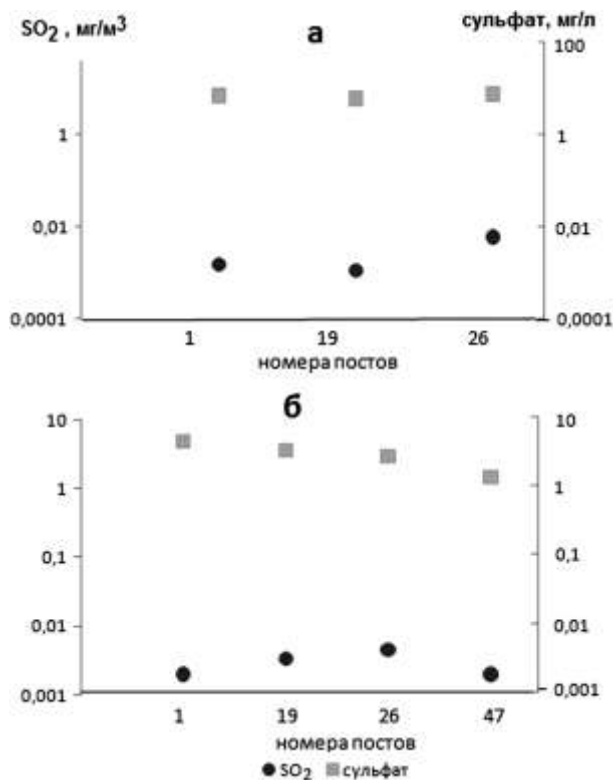


Рис. 7. Содержание SO₂ в атмосферном воздухе (мг/м³) и сульфат-ионов в снеговом покрове (мг/л) на постах г. Новосибирска для зимних сезонов: *а* — 2007/08 г.; *б* - 2008/09 г.

степень их согласованного изменения в обеих средах. Так же как и для диоксида азота и нитрат-ионов, в данном случае наблюдается некоторое снижение уровней концентраций диоксида серы в воздухе и сульфат-ионов в снеге для зимнего сезона 2008/09 г. в сравнении с сезоном 2007/08 г. Однако в данном случае такая тенденция менее выражена, чем для оксидов азота.

Заключение

Результаты экспериментальных исследований и численного анализа данных наблюдений загрязнения атмосферного воздуха и снегового покрова на стационарных постах Гидрометеослужбы г. Новосибирска позволили установить в большей степени качественные закономерности между концентрациями таких примесей, как сажа и бенз(а)пирен (ПАУ); диоксид серы и сульфаты; взвешенные вещества и осадок. В этой связи необходимо проведение дальнейших исследований по выявлению и количественному уточнению межсредовых связей для перечисленных примесей.

Для концентраций нитратов и нитритов в снеге и соответствующими окислами азота в атмосфере получено вполне удовлетворительное количественное согласие в их изменениях в сопредельных средах. Результаты этих исследований могут быть использованы для взаимного контроля данных наблюдений в снеге и приземном слое воздуха, существенно дополнить в зимнее время стационарную сеть наблюдений. Полученные зависимости для азотсодержащих примесей указывают на возможность создания экономичной системы мониторинга и получения на ее основе более детальной оценки состояния длительного загрязнения атмосферы города в зимнее время. В дальнейшей перспективе для данных примесей проведенные исследования могут послужить основой для установления нормативных критериев (ПДК) для оценки загрязнения снегового покрова (на сегодняшний день ПДК в снеговом покрове не разработаны).

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 4, интеграционного проекта СО РАН № 84.

Литература

1. Безуглая Э.Ю. Мониторинг состояния загрязнения атмосферы в городах. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 200 с.
2. Безуглая Э.Ю., Расторгуева Г.П., Смирнова И.В. Чем дышит промышленный город. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 256 с.
3. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 448 с.
4. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 448 с.
5. Временные методические указания по химическому анализу атмосферного воздуха с отбором проб на твердые пленочные сорбенты. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 36 с.
6. Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 334 с.

7. *Методические* рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве. М.: ИМГРЭ, 1990. 16 с.
8. *Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д.* Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 182 с.
9. *Бояркина А.П., Байковский В.В., Васильев Н.В., Глухов Г.Г., Медведев М.А., Писарева Л.Ф., Резчиков В.И., Шелудько С.И.* Аэрозоли в природных ландшафтах Сибири. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1993. 157 с.
10. *Таловская А.В., Язиков Е.Г., Панченко М.В., Козлов В.С.* Мониторинг потоков аэрозольных выпадений в фоновых районах Томской области // *Оптика атмосферы и океана*. 2007. Т. 20, № 6. С. 517—523.
11. *Рапута В.Ф., Королева Г.П., Горшков А.Г., Ходжер Т.В.* Исследование процессов длительного загрязнения окрестностей Иркутска тяжелыми металлами // *Оптика атмосферы и океана*. 2001. Т. 14, № 6-7. С. 623—626.
12. *Безуголова Н.Н., Букатый В.И., Суковатов Ю.А., Суковатов К.Ю., Суторихин И.А.* Восстановление поля концентраций аэрозоля, выпавшего на снег за зимний период в окрестностях ТЭЦ-2 г. Барнаула // *Оптика атмосферы и океана*. 2007. Т. 20, № 7. С. 622—626.
13. *Смоляков Б.С., Шинкоренко М.П.* Сезонная динамика ионного состава атмосферных аэрозолей и осадков в Новосибирской области // *Оптика атмосферы и океана*. 2002. Т. 15, № 5-6. С. 464—470.
14. *Королева Г.П., Горшков А.Г., Виноградова Т.П., Бутаков Е.В., Маринайте И.В., Ходжер Т.В.* Исследование загрязнения снегового покрова как депонирующей среды (Южное Прибайкалье) // *Химия в интересах устойчивого развития*. 1998. Т. 6, № 4. С. 327—337.
15. *Прокачева В.Г., Усачев В.Ф.* Снежный покров в сфере влияния города. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 176 с.
16. *О санитарно-эпидемиологической обстановке и соблюдении законодательства в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека на территории Новосибирской области в 2008 году: Государственный доклад*. Новосибирск, 2009. 343 с.
17. *Коковкин В.В., Рапута В.Ф., Шуваева О.В.* Пространственная динамика аэрозольных выбросов угольной котельной // *Химия в интересах устойчивого развития*. 1999. Т. 5, № 7. С. 477—483.
18. *Ровинский Ф.Я., Теплицкая Т.А., Алексеева Т.А.* Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 224 с.
19. *Климат Новосибирска* / Под ред. С.Д. Кошинского, К.Ш. Хайруллина, Ц.А. Швер. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 221 с.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ПРОГНОЗ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА С ОБУЧЕНИЕМ ПО МЕТОДУ ГРУППОВОГО УЧЕТА АРГУМЕНТОВ

М.Я. Здерева, В.М. Токарев, М.В. Виноградова

*ГУ «Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт»,
г. Новосибирск*

С температуры воздуха началась объективизация методов среднесрочного прогноза погоды на базе гидродинамической продукции. Уже первые дошедшие до Сибири выпуски прогностических полей геопотенциала на АТ-500 до 72 ч дали возможность разработать схему расчетов средней температуры и ее аномалии на пентаду [1]. Следующий шаг в исследованиях институтской лаборатории был осуществлен с появлением модельных полей давления у земли и температуры на АТ-850 на сроки до 120 ч, что позволило рассчитывать прогнозы минимальных и максимальных температур воздуха по дням пентады [2]. Алгоритмы базируются на уравнениях регрессии, построенных на ежемесячных выборках фактических данных 1971—1980 гг. Список потенциальных предикторов ограничен выходной продукцией схемы ЕЦСПП того времени, включающей температуру воздуха на АТ-850, геопотенциал на АТ-500 и давление воздуха на уровне станции. Уравнения получены для 43 основных пунктов Урала и Западной Сибири и до сих пор задействованы в оперативной технологии.

Изменения, происшедшие за тридцать лет, коснулись практически всех блоков интерпретационных схем:

- Гидродинамическое моделирование приобрело качественно другой уровень: повысилась оправдываемость прогнозов на близкие сроки, возросла степень детализации их по времени и пространству; увеличилась заблаговременность репрезентативных прогнозов; расширился список прогнозируемых элементов.
- Развитие вычислительной техники и программных приложений добавило новые возможности автоматизации ранее трудоемких процедур по формированию банка данных и информационному обмену и т. д.
- Появились не используемые ранее методические алгоритмы.

Все это позволило подойти к разработкам новой продукции, нацеленной на повышение уровня обслуживания потребителей прогностической гидрометеорологической информацией. Первой поставленной задачей в этом ряду было создание схемы с более детальными прогнозами температуры воздуха по пространству: по любому пункту, имеющему метеорологические наблюдения сначала Новосибирской области, а затем и Западно-Сибирского региона [3—5]. В данной статье рассмотрим методические особенности последней работы.

Базовые выборки

Прежде всего с помощью современной автоматизированной технологии обновлен исходный банк данных. В качестве предиктанта выступают ежедневные сведения о фактических минимальной и максимальной температурах воздуха на метеостанциях за 2002—2008 гг. Базовой информацией для параметров-предикторов служат поля объективного анализа гидродинамических схем за аналогичный период, т. е. к исходным данным применены алгоритмы инициализации конкретной схемы, и данные определены в аналогичных узлах регулярной сетки.

Для накопления архивов использованы модельные выпуски схем ECMF (Рединг) и UKMO (Эксетер). Первая является наиболее надежной по оценкам ожидаемых синоптических процессов и значений в метеополях, вторая — имеет более широкий список выходных элементов. Модельные данные представлены в узлах географической сетки $2,5^\circ \cdot 2,5^\circ$. Для исследуемой территории Западной Сибири произведена вырезка из секторов S и T для Северного полушария от $47,5^\circ$ до $110,0^\circ$ по широте и от $82,5^\circ$ до $35,0^\circ$ по меридиану. Сектор рассматриваемых данных для каждой станции региона состоит из 5 узлов (примерно по 1300 км в средних широтах) в каждую сторону света от центрального узла, определенного по минимальному расстоянию до станции. Такой выбор территории позволяет с запасом учесть вариации расчетов показателей ожидаемых процессов синоптического масштаба. В качестве исходных параметров-предсказателей используются как непосредственно модельные данные метеоэлементов, так и их расчетные производные: лапласианы, градиенты, тенденции (см. таблицу). Для учета крупномасштабной изменчивости выборка разбита на характерные для юга Западной Сибири периоды года: холодный (январь — март, ноябрь — декабрь), теплый (июнь — август), переходный (апрель — май, сентябрь — октябрь).

Исходные параметры-предсказатели

Номер параметра		Обозначение параметра	Параметр (единицы измерения)
Срок 00	Срок 12		
1	18	H500	Геопотенциал на уровне АТ500 (Дам)
2	19	H700	Геопотенциал на уровне АТ700 (Дам)
3	20	H850	Геопотенциал на уровне АТ850 (Дам)
4	21	P89	Давление на уровне моря (гПа)
5	22	R700	Влажность воздуха на уровне АТ700 (%)
6	23	T700	Температура воздуха на уровне АТ700 (°C)
7	24	T850	Температура воздуха на уровне АТ850 (°C)
8	25	T98	Температура воздуха на уровне станции (°C)
9	26	LH500	Лапласиан геопотенциала на уровне АТ500 (Дам/100 км)
10	27	GH500	Градиент геопотенциала на уровне АТ500 (Дам/100 км)
11	28	TH500	Суточное изменение геопотенциала на уровне АТ500 (Дам)
12	29	LP89	Лапласиан давления на уровне моря (гПа/100 км)
13	30	GP89	Градиент давления на уровне моря (гПа/100 км)
14	31	TP89	Суточное изменение давления на уровне моря (гПа)
15	32	LT850	Лапласиан температуры воздуха на уровне АТ850 (°C/100км)
16	33	GT850	Градиент температуры воздуха на уровне АТ850 (°C/100 км)
17	34	TT850	Суточное изменение температуры воздуха на уровне АТ850 (°C)

Метод группового учета аргументов

Применение статистического аппарата повышает эффективность методов, если исследователь основывается на физических связях между предиктантом и предикторами. В ранних исследованиях подбор информативных предикторов осуществлялся на предварительном этапе с помощью ручного анализа корреляционных зависимостей. Позднее эта задача все более передавалась статистическим автоматизированным

алгоритмам. Например, в схеме Гидрометцентра РФ используется метод сокращения Дулиттла [6], основанный на пошаговом отборе информативных предикторов с анализом вклада каждого последующего в долю дисперсии. На автоматическом переборе признаков построен и примененный к новой схеме СибНИГМИ метод группового учета аргументов (МГУА).

МГУА построен на принципе самоорганизации, суть которого состоит в том, что при переборе аргументов и постепенном усложнении моделей некоторые критерии проходят свой минимум. Алгоритм определяет этот минимум и таким образом указывает на оптимальную модель. Основным достоинством и принципиальным отличием МГУА является привлечение внешних критериев. Это способствует построению непротиворечивых моделей, т. е. дающих устойчивый результат независимо от исходных данных. В исследованиях, посвященных прогнозу или восстановлению тех или иных метеорологических полей, до настоящего времени незаслуженно редко используются индуктивные методы математического моделирования, основанные на принципе самоорганизации моделей по внешним критериям. Критерий среднеквадратической ошибки, используемый в методе регрессионного анализа, по определению является внутренним, поскольку рассчитан по той же информации, по которой получена сама модель. В [7] показано, что любой внутренний критерий приводит к ложному правилу: чем сложнее модель, тем она точнее. Согласно теореме неполноты Геделя из математической логики, только внешние критерии позволяют выбрать единственную модель оптимальной сложности.

Внешние критерии рассчитываются по выборке, не входящей в обучение. При этом по основной части исходных фактических данных получаются коэффициенты моделей — претендентов, а по другой — оценки этих моделей по выбранным критериям селекции. Разделение исходной выборки на обучающую и проверочную последовательности определяется исследователем. Чтобы исключить влияние многолетнего тренда, в проверочную часть выборки нами отобран каждый третий случай из базовой информации.

Из предложенных в [7] внешних критериев селекции нами использованы регулярность и минимум смещения. В качестве критерия регулярности служит относительная среднеквадратическая ошибка

$$\Delta^2 B = \frac{\sum_{i=1}^{N_B} q_i - q_i^2}{\sum_{i=1}^{N_B} q_i^2} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где q_i и q_i^* — полученное по модели и действительное значение выходной величины в i -й точке; N_B — число точек проверочной последовательности.

Чем меньше величина относительной среднеквадратической ошибки, тем модель более регулярна.

При большом уровне шумов в исходных данных более устойчивыми к помехам являются различные формы критерия минимума смещения. Суть этого критерия состоит в том, что модели, построенные на разных частях исходной последовательности, должны как можно меньше отличаться друг от друга. Сначала первая последовательность данных является обучающей, а вторая — проверочной (решения $q_i(A)$). Затем, наоборот, вторая является проверочной, а первая — обучающей (решения $q_i(B)$). Близость этих уравнений оценивается по величине среднеквадратического расхождения их выходов по всем точкам последовательности:

$$n_{sm}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N [q_i(A) - q_i(B)]^2}{\sum_{i=1}^N q_{i\text{факт}}^2}. \quad (2)$$

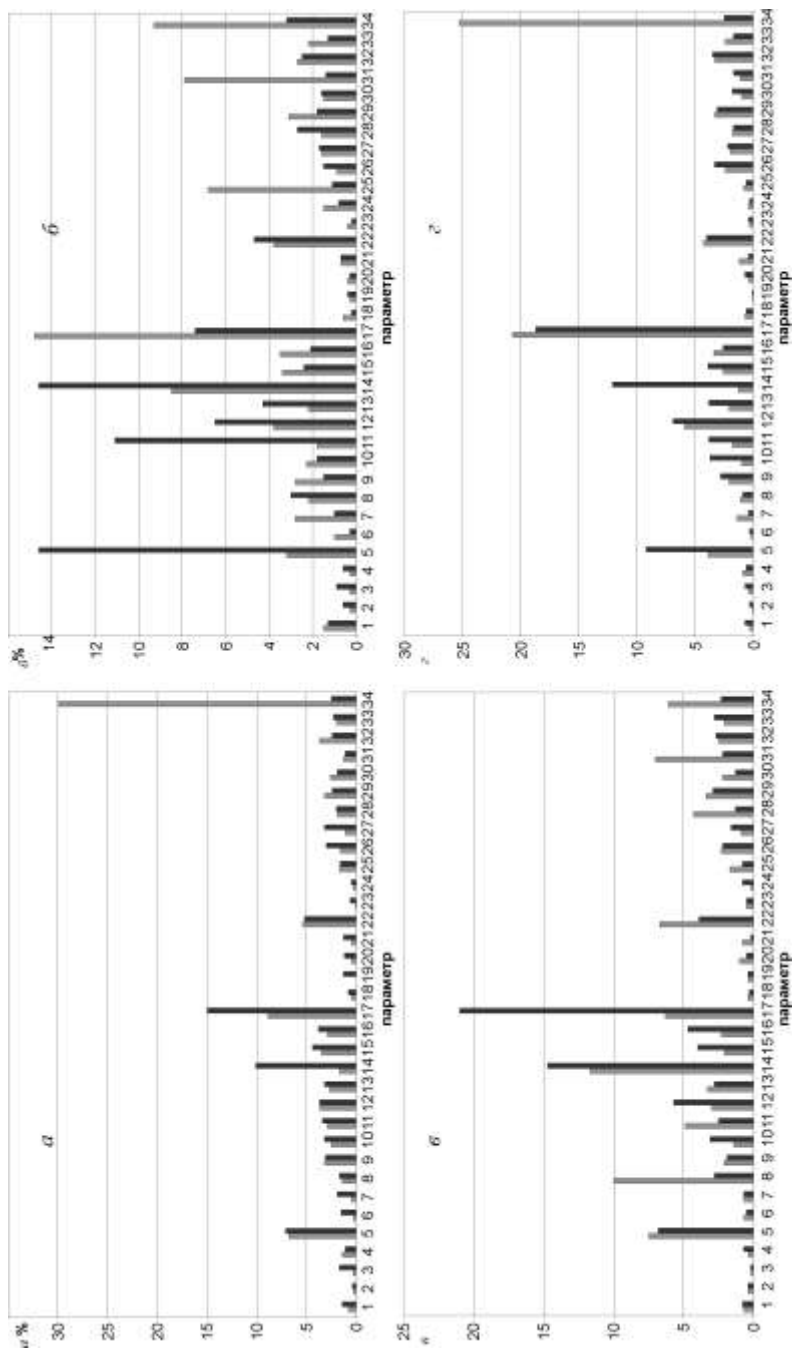
Для решаемой задачи в нашем случае выбирались 10 лучших уравнений по критерию регулярности и из них — лучшее по минимуму смещения.

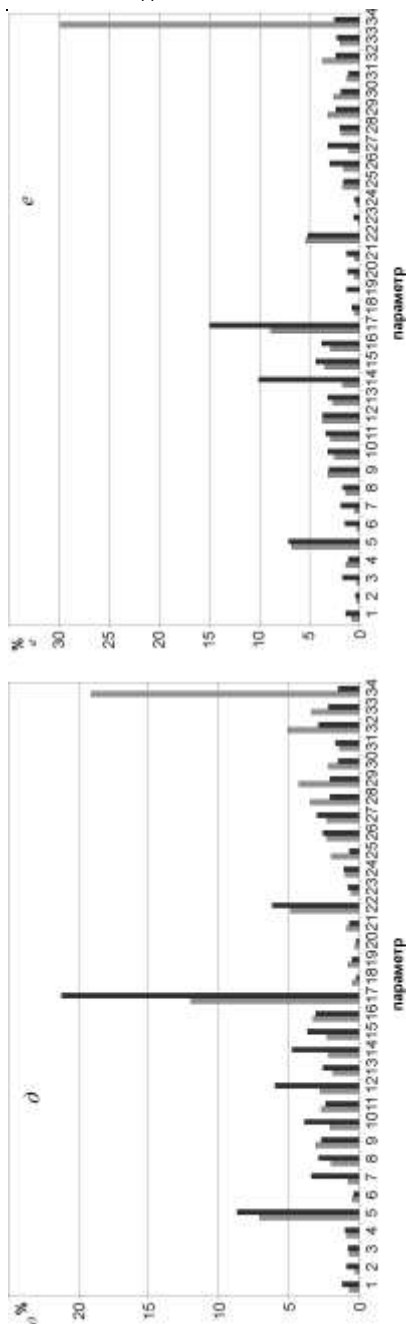
В МГУА предусмотрена возможность увеличить первоначально ограниченное число коэффициентов модели применением многорядной селекции. Из всех частных уравнений, построенных на обучающей выборке, выбираются F лучших, дающих минимальные критерии селекции на контрольной выборке. Во втором ряду образуются пары выходных переменных, прошедших первый ряд, и для каждой из них строятся частные уравнения и т.д. Нарастивание рядов селекции продолжается до тех пор, пока основной критерий не начнет расти. Однако в нашем случае опыт использования алгоритма показал, что каждый следующий ряд практически не добавляет качества восстановления. Кроме того, при работе на прогностической базе есть риск увеличить произведениями случайные ошибки моделей. Таким образом, для решения наших задач достаточно одного ряда.

Информативность потенциальных предикторов

Эффективность построенных МГУА моделей существенно зависит от информативности подаваемых на вход признаков. Однако многократное решение систем уравнений с объемной матрицей данных при-

водит к большим затратам процессорного времени на его отработку, поэтому разумно провести предварительный этап просеивания исходного признакового пространства с помощью более быстрых алгоритмов.





1 Повторяемость (%) параметров в DW-деревьях для минимальной (■) и максимальной (▣) температур воздуха: для похолоданий (а, б), для потеплений в холодном (б), переходном (е) и теплом (е) периодах года

Одним из таких вариантов является так называемый DW-алгоритм построения логических деревьев [8].

Для температуры рассмотрены логические деревья, отделяющие классы динамических изменений (похолоданий или потеплений) от инерционных ситуаций. Деревья построены по трем периодам года для каждой станции региона, отдельно для максимальной и минимальной температур. К похолоданиям отнесены ситуации с суточным изменением температуры воздуха у земли на рассматриваемой станции, меньше или равным 5°C , соответственно к потеплениям — больше или равным 5°C .

Повторяемость признаков в DW-деревьях в регионе по сезонам и полу суткам приведена на рисунке. Видно, что во все сезоны основным показателем ожидаемых изменений температуры воздуха у земли по модельным данным являются прогнозируемые суточные изменения температуры воздуха на АТ-850 (17 и 34 параметры). Причем изменения тропосферной температуры преимущественно синхронны изменениям темпе-

ратуры воздуха у земли, лишь зимой данные первой за срок 00 МГВ (17 параметр) отражают изменения как ночной, так и дневной приземной температуры. Связь температуры и давления в зимнее время и для минимальной температуры в переходный период года подтверждается частым попаданием в ветки деревьев тенденции давления (14 параметр) и показателя барической топографии — лапласиана (12 параметр). Отражают изменения в температурном поле и показатели влажности, значения 5 и 22 параметров (относительная влажность на АТ-700) относительно часто определяет DW-решение. Повторяемость остальных признаков, подаваемых на вход алгоритма, неравномерно распределена по отдельным областям Западной Сибири и по суточному ходу предиктанта. Так, значения геопотенциала H500 (1 и 18 параметры) в основном отмечены для территории Новосибирской области в случаях, связанных с потеплением. Лапласианы и градиенты данного элемента (9, 26 и 10, 27 параметры) попали лишь в «деревья» для дневных похолоданий на севере региона — в ХМАО. А вот произошедшие изменения геопотенциала (11 и 28 параметры) влекут за собой как похолодания, так и потепления. Градиент давления (13, 30 параметры) в решающих ветках дерева кластеризации отмечен в единичных случаях, а повторяемость лапласиана давления (12, 29 параметры) максимальна на территории Алтайского края.

Окончательный вариант метода

В конечном итоге метод прогноза температуры базируется на уравнениях МГУА, построенных для каждой станции рассматриваемого региона, отдельно для минимальной и максимальной температур воздуха.

Предварительный анализ DW-решений позволил оставить на входе МГУА порядка 10—15 предикторов. Исходные выборки построены по периодам года с учетом сезонной изменчивости температуры. Для кластеризации рабочих выборок внутри сезонов применено деление по изменениям в барическом поле и в поле температуры на АТ-850. Порогом служит знак ожидаемой тенденции (по суточной разности) давления и температуры в большинстве из 25 окружающих станцию узлов.

Обратное решение задачи состоит в восстановлении минимальной и максимальной температур по соответствующим для заданного пункта уравнениям с учетом текущего сезона и ожидаемых термобарических изменений. Заблаговременность прогнозов определяют исходные модельные поля.

Полученные уравнения и программное обеспечение для восстановления значений вставлены в автоматизированную линию получения

расчетных прогнозов по Западной Сибири. Ежедневные расчеты включаются в анализ и оценку как оперативные испытания метода и технологии.

Литература

1. *Храмцова И.Г., Шульман С.М.* Схема прогноза средней температуры воздуха и ее аномалии на 5 дней // Труды ЗСРНИГМИ. 1979. Вып. 42. С. 56—63.
2. *Храмцова И.Г., Шустова Г.А.* Схема прогноза температуры воздуха у земли на 5 суток по дням для районов Сибири // Труды ЗапСибНИИ. 1986. Вып. 79. С. 10—22.
3. *Здерева М.Я., Торубарова Г.П., Шустова Г.А.* Физико-статистическая схема прогноза экстремальной температуры воздуха по станциям Новосибирской области на 1—5 суток // Труды СибНИГМИ. Вып. 105. http://sibnigmi.ru/documents/papers_v105.pdf
4. *Здерева М.Я., Токарев В.Г., Торубарова Г.П.* О результатах испытания метода и технологии прогноза температуры воздуха по полусуткам пентады для административных районов Новосибирской области (Новосибирский ЦГМС-РСМЦ, СибНИГМИ) // Информационный сборник. 2006. № 33. С. 54—66.
5. *Здерева М.Я., Виноградова М.В.* Среднесрочный прогноз степени пожарной опасности в лесах по метеорологическим условиям // Метеорология и гидрология. 2009. № 1. С. 16.
6. *Васильев П.П., Васильева Е.Л.* Система статистической интерпретации выходной продукции гидродинамических моделей для среднесрочного прогноза погоды // 70 лет Гидрометцентру России. СПб.: Гидрометеиздат, 1999. С. 118—133.
7. *Ивахненко А.Г., Юрачковский Ю.П.* Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. М.: Радио и связь, 1987. 120 с.
8. *Здерева М.Я., Токарев В.М.* Анализ и прогноз условий погоды, влияющих на концентрацию атмосферных примесей мегаполиса // См. наст. сб.

АНАЛИЗ И ПРОГНОЗ УСЛОВИЙ ПОГОДЫ, ВЛИЯЮЩИХ НА КОНЦЕНТРАЦИЮ АТМОСФЕРНЫХ ПРИМЕСЕЙ МЕГАПОЛИСА

М.Я. Здерева, В.М. Токарев

*ГУ «Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт»,
г. Новосибирск*

Анализ структуры временных рядов концентраций атмосферных примесей Новосибирска [1] показал, что в многофакторных процессах формирования и снижения концентраций примесей мегаполиса роль погодных условий не обязательно является преобладающей, и ее выделение представляет сложную задачу типа распознавания слабого сигнала на фоне сильных помех.

Отметим, что задача численной оценки влияния погодных условий на уровни концентраций в общем виде методически не корректна, поскольку формируются повышенные уровни, в основном в масштабе 10^0 — 10^1 км, рассеиваются в более широком диапазоне — 10^0 — 10^2 км, но все-таки в рамках мезомасштаба, а реально доступный анализ и прогноз условий погоды — это синоптический масштаб.

Представляющие понятный практический интерес анализ и прогноз уровней превышения ПДК имеют еще меньше отношения к физике атмосферы, поскольку ПДК отражают лишь биологические пороги для различных химических соединений. Но некоторый фоновый прогноз условий погоды, влияющих на концентрацию атмосферных примесей мегаполиса, можно попытаться получить, опираясь на слабые межмасштабные связи и определенную инерционность части компонентов атмосферных примесей.

Исходной информацией для анализа и построения статистических моделей прогноза послужили архивные данные наблюдений ЦМС Новосибирск за 2005—2008 гг. (10 постов, 11 примесей) и синхронные данные ГРИБ.

Предикторы на базе модельных данных в узлах сетки ГРИБ:

- H500 — геопотенциал на уровне АТ500 (гпдкм);
- P0 — давление на уровне моря (гПа);
- R — влажность воздуха на уровне АТ700 (%);

- lapH500 — лапласиан геопотенциала на уровне АТ500 (гпдкм/1000 км);
- gradH500 — градиент геопотенциала на уровне АТ500 гпдкм/1000 км;
- $\text{H500}(t) - \text{H500}(t-24)$ — суточное изменение геопотенциала на уровне АТ500 (гпдкм);
- lapP0 — лапласиан давления на уровне моря (гПа/1000 км);
- gradP0 — градиент давления на уровне моря (гПа/1000 км);
- $\text{P0}(t) - \text{P0}(t-24)$ — суточное изменение давления на уровне моря (гПа);
- lapT850 — лапласиан температуры воздуха на уровне АТ850 ($^{\circ}\text{C}/1000$ км);
- gradT850 — градиент температуры воздуха на уровне АТ850 ($^{\circ}\text{C}/1000\text{км}$);
- $\text{T850}(t) - \text{T850}(t-24)$ — суточное изменение температуры на уровне АТ850 ($^{\circ}\text{C}$);
- Tz-T850 — вертикальный градиент температуры ($^{\circ}\text{C}$);
- VV — скорость ветра у земли (м/с)

Учитывая априорные соображения по поводу метеорологических факторов, участвующих в формировании уровней концентрации примесей, не будем, по возможности, пропускать на обучение точечные данные превышений уровней ПДК. Условие подтверждения превышения ПДК еще хотя бы на одном посту должно ослабить влияние точечных выбросов и уменьшить статистический шум.

Методическая часть работы предполагает построение подходящей статистической модели для прогноза (не)благоприятных условий погоды и связанных с ними случаев превышения пороговых значений концентрации примесей. Это задача дискриминации или распознавания образов. Учитывая многомерность данных как предиктора, так и предиктанта, будем использовать вариант алгоритма построения логического дерева решений [2] с уточненным критерием разделения ветвей. Предикторами будут прогностические значения параметров выходной продукции мировых центров обработки данных и их физически обоснованные комбинации, а статистическое обучение — на синхронных данных с нулевой заблаговременностью.

Рассмотрим подробнее выбор критерия сбалансированного разделения ветвей дерева логических решающих правил, поскольку это ключевой момент алгоритма.

Пусть на данном шаге деления обучающей выборки получена подвыборка, состоящая из N_a элементов класса А; N_b элементов класса В с вероятностями классов соответственно:

$$\begin{aligned} \text{Ver}(A) &= N_a / (N_a + N_b), \\ \text{Ver}(B) &= N_b / (N_a + N_b). \end{aligned} \quad (1)$$

На каждом шаге перебора всех значений всех признаков подвыборка $N_a + N_b$ делится на две новые: $N_{a1} + N_{b1}$ и $N_{a2} + N_{b2}$ со своими вероятностями классов

$$\begin{aligned} \text{Ver1}(A) &= N_{a1} / (N_{a1} + N_{b1}), \\ \text{Ver1}(B) &= N_{b1} / (N_{a1} + N_{b1}) \end{aligned}$$

и

$$\begin{aligned} \text{Ver2}(A) &= N_{a2} / (N_{a2} + N_{b2}), \\ \text{Ver2}(B) &= N_{b2} / (N_{a2} + N_{b2}). \end{aligned} \quad (2)$$

На этом этапе нам нужно определить подходящий критерий для выбора лучшего условия (признак и его пороговое значение) разделения классов подвыборки в данном узле логического дерева.

Можно просто максимизировать разность вероятностей класса после деления: $\text{Max}(\text{Abs}(\text{Ver1}(A) - \text{Ver2}(A)))$, но в случае сильно асимметричной исходной выборки (доминирующий класс) симметричное разделение не будет оптимальным. Предпочтительнее рассматривать разделение вероятностей относительно исходной для данного узла:

$$dV_{12} = dV_1 + dV_2,$$

где

$$\begin{aligned} dV_1 &= (\text{Ver}(A) - \text{Ver1}(A)) / \text{Ver}(A) \text{ при } \text{Ver}(A) > \text{Ver1}(A), \\ dV_1 &= (\text{Ver1}(A) - \text{Ver}(A)) / (1 - \text{Ver}(A)) \text{ при } \text{Ver1}(A) > \text{Ver}(A) \end{aligned}$$

и

$$\begin{aligned} dV_2 &= (\text{Ver}(A) - \text{Ver2}(A)) / \text{Ver}(A) \text{ при } \text{Ver}(A) > \text{Ver2}(A), \\ dV_2 &= (\text{Ver2}(A) - \text{Ver}(A)) / (1 - \text{Ver}(A)) \text{ при } \text{Ver2}(A) > \text{Ver}(A). \end{aligned} \quad (3)$$

Критерий dV_{12} хорошо учитывает асимметрию классов, но не защищен от выбора почти вырожденного разделения с минимальным числом элементов в одной из ветвей дерева. Введение весового множителя, пропорционального числу элементов после разделения, позволяет сбалансировать ветви дерева:

$$dV_{12n} = dV_{1n} + dV_{2n},$$

где

$$\begin{aligned}dV1n &= (Na1 + Nb1)/(Na+Nb) \cdot dV1, \\dV2n &= (Na2 + Nb2)/(Na+Nb) \cdot dV2\end{aligned}\quad (4)$$

или после упрощений

$$dV1n = (Na \cdot Nb1 - Nb \cdot Na1)/Na/(Na + Nb), \text{ если } > 0,$$

иначе

$$(Nb \cdot Na1 - Na \cdot Nb1)/Nb/(Na + Nb);$$

$$dV2n = (Na \cdot Nb2 - Nb \cdot Na2)/Na/(Na + Nb), \text{ если } > 0,$$

иначе

$$(Nb \cdot Na2 - Na \cdot Nb2)/Nb/(Na + Nb). \quad (5)$$

Шаг перебора пороговых значений признаков с максимальным значением критерия $dV12n$ даст нам логическое условие разделения выборки данного узла дерева на две по возможности сбалансированные ветви с максимально разнесенными условными вероятностями классов.

Используя различные варианты данного критерия, можно получать различные решающие правила, в том числе настроенные на распознавание маловероятных событий для сильно асимметричной обучающей выборки. В данном случае вероятности превышения ПДК много меньше 0,5.

Для обучения использовались случаи превышения ПДК на двух и более постах наблюдений одновременно, чтобы минимизировать влияние локальных превышений уровня в пользу площадных, которые более определено связаны с условиями погоды, а не только с источником выброса. Таким образом, были построены решающие правила по всем примесям, которые имели значимое число случаев превышения ПДК. Результирующие примеры для пыли и двуокиси азота приведены в табл. 1 и 2.

Оценка вероятности распознавания (разделения) определяет точность прогноза, а число шагов прогноза — надежность полученных оценок. Нулевой (климатический) прогноз дает нулевую предупреденность и общую оправдываемость тем выше, чем более редкое явление прогнозируется. На каждом следующем шаге распознавания растет точность разделения классов, но надежность падает в силу уменьшения остаточной выборки и, соответственно, возрастания роли случайности (статистического шума). Формально сбалансированный вариант дерева может быть получен максимизацией минимальной из пары общеприня-

тых оценок качества прогнозов бинарных предиктантов: общей оправдываемости и предупрежденности. Это защита от вырождения алгоритма в случае несимметричности классов предиктанта (редкие явления).

Таблица 1

**DW-дерево распознавания превышения уровня ПДК
для концентрации пыли (Новосибирск)**

Пыль (>0,5), число случаев = 141/1160, вероятность = 0,12							
H500(12)							
<=549 (0,43) 27/497 = 0,05				>549 (0,57) 114/663 = 0,17			
r(00)				VV(00)			
>72 (0,18) 5/214 = = 0,02	<=72 (0,24) 22/283 = 0,08			>5(0,31) 41/354 = 0,12		<=5 (0,27) 73/309 = 0,24	
	H500(12)			r(00)		Tz—T850	
	<=533 (0,07) 0/81 = = 0,00	533.549 (0,17) 22/202 = = 0,11		>64 (0,13) 8/148 = = 0,05	<=64 (0,18) 33/206 = = 0,16	>2 (0,17) 33/198 = = 0,17	<=2 (0,10) 40/111 = = 0,36
106	35	141	Предупрежденность: 75 %				
409	610	1019					
515	645	1160	Общая оправдываемость: 62 %				

Таблица 2

**DW-дерево распознавания превышения уровня ПДК
для концентрации двуокиси азота (Новосибирск)**

NO ₂ (>0,2), число случаев = 104/1160, вероятность = 0,09							
Tz-T850(00)							
>3 (0,43) 27/501 = 0,05				<=3 (0,57) 77/659 = 0,12			
P0(00)				gradT850(00)			
>1010 (0,25) 9/292 = 0,03		<=1010 (0,18) 18/209 = 0,09		>20 (0,45) 48/525 = 0,09		<=20 (0,12) 29/134 = 0,22	
lapP0(12)		gradP0(00)		P0(00)-P0(00—24)		H500(12)	
>-39 (0,19)	<=-39 (0,06)	<=26 (0,09)	>26 (0,09)	>-7 (0,22)	<= -7 (0,23)	>554 (0,06)	<= 554 (0,05)

ту давления, который при реанализе, видимо, лучше представляется в виде поля и для двух примесей выбирается алгоритмом. Градиент температуры в пограничном слое ожидаемо хорошо работает на концентрацию половины примесей, причем для аммиака, в отличие от других компонентов, связь обратная — термическая устойчивость снижает концентрацию. Возможно, это связано с расстоянием от источника до ближайшего поста наблюдения. Высота поверхности H500 хорошо представлена в деревьях, скорее всего, благодаря четкому годовому ходу, эмулируя тем самым признак сезона года. Следует учитывать, что полученные связи достаточно тонкие и не обязательно устойчивые, но многие другие алгоритмы (типа регрессии) вообще в данной ситуации не применимы.

Технология автоматизированного прогноза предусматривает следующие этапы:

- оперативный доступ разработанного программного обеспечения к прогностическим данным ГРИБ на 1—3 суток;

- вычисление признаков и оценка вероятностей превышения ПДК по соответствующим ветвям логического дерева;

- формирование прогностического сообщения и передача его в канал связи для доставки пользователям.

Основные результаты выполненной работы относятся к двум направлениям:

- за счет тонкого статистического анализа получены достаточно обоснованные, хотя и не слишком устойчивые связи концентраций комплекса атмосферных примесей с параметрами атмосферы, доступными для прогнозов на 3—5 суток;

- разработаны метод и технология прогноза уровня загрязнения атмосферы по комплексу примесей мегаполиса.

Гибкость вероятностного подхода к построению логических деревьев оставляет возможность корректировки полученных решающих правил без повторного обучения выбором значений критерия отсека.

Выбор пороговых вероятностей для сведения прогноза к детерминированному (бинарному) варианту может также осуществляться вне рамок построения модели статистического распознавания с использованием матрицы потерь конкретного пользователя.

По результатам оперативных годичных испытаний в ЦМС Новосибирска технология прогноза рекомендована к внедрению как основная.

Литература

1. Келяшова П.Е., Токарев В.М. Анализ временных рядов атмосферных примесей в г. Новосибирске // Наст. сборник.

2. *Манохин А.Н.* Алгоритм DW для распознавания образов: Пакет прикладных программ ОТЭКС. Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1981. С. 3—30.

АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ АТМОСФЕРНЫХ ПРИМЕСЕЙ В ГОРОДЕ НОВОСИБИРСКЕ

Р.Е. Келяшова, В.М. Токарев

*ГУ «Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт»,
г. Новосибирск*

Известно, что концентрация атмосферных примесей в приземном слое атмосферы зависит от условий погоды. Самым наглядным примером служат зимние морозные туманы при мощных инверсиях и штиле. Однако детальные связи концентраций примесей различной природы с погодой не столь очевидны, поскольку, во-первых, условия погоды сами по себе не генерируют примеси, а только способствуют или препятствуют их рассеянию, во-вторых, пространственные масштабы загрязнений мегаполиса и синоптических процессов отличаются на 1—2 порядка. Очевидно также, что примеси имеют различную природу, физические и химические свойства и по-разному реагируют на погодные условия. Отсюда вытекает необходимость анализа отдельных компонентов, из которых складывается общий фон уровня загрязнения атмосферы мегаполиса.

Целью исследования является изучение структуры временных рядов концентраций примесей и их потенциальной связи с условиями погоды. Исходной информацией для анализа временных рядов атмосферных примесей послужили данные измерений в 2005—2008 гг. на 10 постах ЦМС Новосибирска уровней концентрации 11 контролируемых примесей (табл. 1).

Ограниченный четырехлетний ряд наблюдений не предполагает получения оценок временной динамики климатического масштаба. Более того, длинные многолетние ряды уровней атмосферных примесей антропогенного происхождения априори включают технологические тренды и скачки, которые практически недоступны для прогноза и должны быть, по возможности, исключены из статистического обучения. Сезонный погодный фактор, напротив, вполне устойчив и «предсказуем» на рядах любой длительности в умеренных широтах.

Исходя из постановки задачи методика должна предусматривать разделение, по возможности, факторов метеорологических и всех про-

Контролируемые примеси и их ПДК

Примесь	ПДК, мг/м ³
Пыль	0,5
Двуокись серы	0,50
Окись углерода	5,0
Двуокись азота	0,2
Окись азота	0,4
Сероводород	0,008
Фенол	0,010
Сажа	0,15
Фтористый водород	0,020
Аммиак	0,20
Формальдегид	0,035

чих, не являющихся объектом исследования. Априорные сценарии формирования уровней загрязнения могут включать следующие варианты:

— источники (выбросы): точечные/площадные, разовые/серийные/постоянные;

— рассеяние: окисление/вымывание/оседание/подъем/перенос.

Условия погоды непосредственно сказываются на все процессы рассеяния и косвенно — на стимулировании некоторой части источников выбросов (ТЭК). Очевидно, относительно адекватную статистическую модель можно построить лишь для множества мелких и постоянных источников примесей, например автотранспорта, а точечные и нерегулярные выбросы будут вносить шум и препятствовать статистическому анализу, нарушая условия его применимости.

Первым этапом исследования будет разведочный анализ данных, включающий графическое представление многомерных временных рядов для предварительной оценки стационарности, эргодичности, непрерывности и полноты данных.

Использованные данные наблюдений ЦМС (11 компонентов, 10 постов, 3 срока, 4 сезона, 4 года) имеют особенности, осложняющие применение классического статистического анализа. Многомерная по своей сути матрица наблюдений (годы, дни, сроки, посты, примеси) очень неоднородна. Все временные ряды прерываются в выходные дни, а список примесей по отдельным постам колеблется от 1 до 11 компонентов. Имеются и нерегулярные пропуски.

Графическое представление данных позволяет в первом приближении оценить возможности статистического анализа и выбора наиболее подходящей методологии и алгоритмов числовой обработки.

Графики выборочной оценки плотности распределения примесей с «тяжелыми» хвостами и даже двумодальностью гистограмм (рис. 1) явно указывают на статистическую неоднородность выборки, в которой присутствуют компоненты различного происхождения. Высокочастотные отрезки гистограмм ожидаемо напоминают функции распределения, характерные для ограниченных, с одной стороны, (положительных) случайных величин. Это могут быть типа усеченного нормального, Вейбулла или экспоненциального.

Синхронные по постам графики многолетних наблюдений отдельных примесей (рис. 2, 3) показывают:

- трендовая составляющая выражена у части примесей (окись углерода, окись и двуокись азота, пыль, сажа, формальдегид), но ее нелинейность и даже отсутствие монотонности не позволяют уверенно строить модель прогноза-экстраполяции даже на 1 год вперед; можно лишь констатировать уменьшение концентраций сажи, связанное с переводом котельных с угля на газ, и объяснимый рост концентраций примесей, связанных с увеличением парка автотранспорта;

- синхронность концентраций в пределах территории мегаполиса (посты) слабая и неустойчивая (кроме окислов азота);

- сезонность выражена слабее, чем можно было бы ожидать;

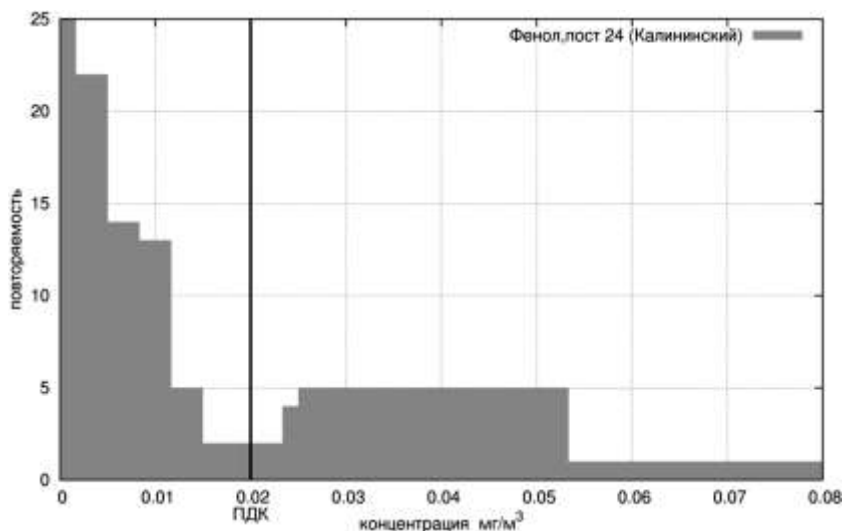


Рис. 1. Гистограмма максимальной суточной концентрации фенола. Новосибирск 2005—2008 гг. Данные ЦМС

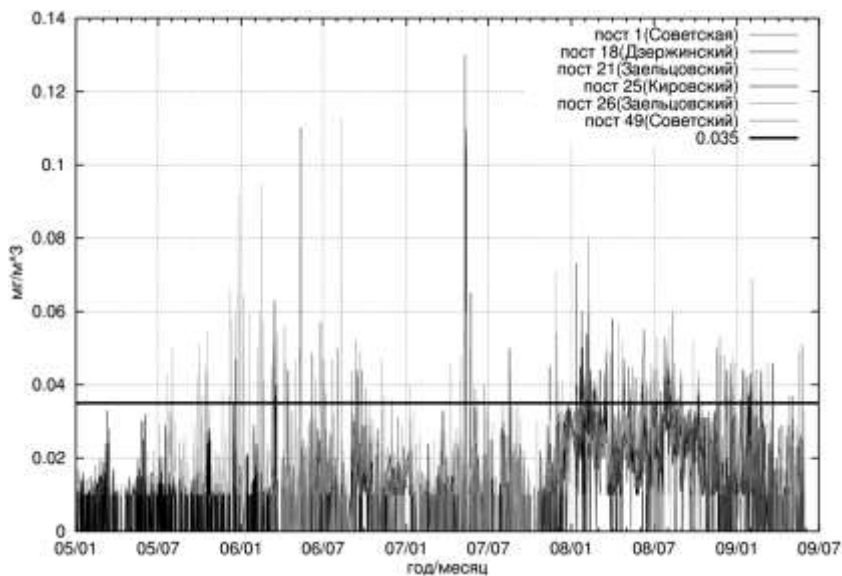


Рис. 2. Многолетний ход значений концентрации формальдегида по 6 постам г. Новосибирска

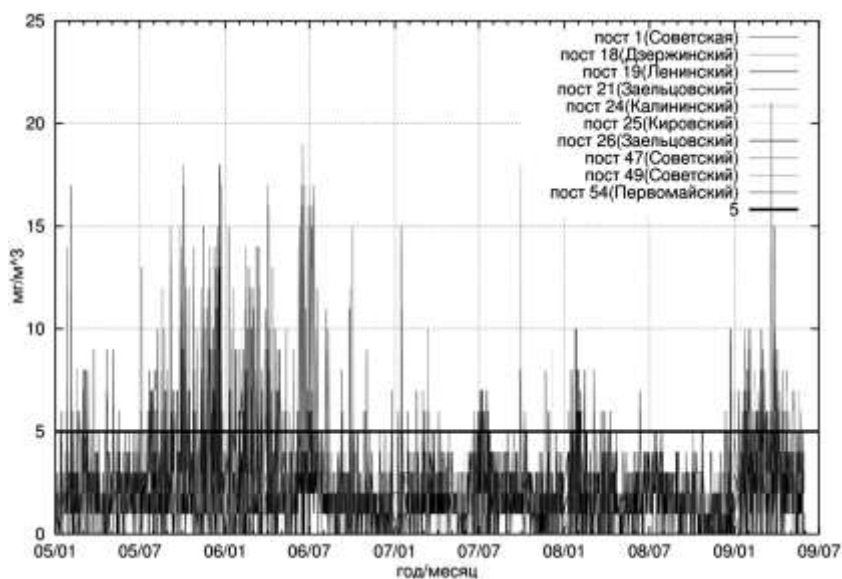


Рис. 3. Многолетний ход значений концентрации окиси углерода по 10 постам г. Новосибирска

— мощность кратковременных нерегулярных всплесков концентраций многократно превышает регулярную динамику типа тренда или сезонности.

Представляет практический интерес отдельный анализ случаев превышения ПДК. Данная выборка имеет еще меньше отношения к физике атмосферы, поскольку ПДК отражают только биологические пороги для различных химических соединений. Некоторые закономерности удалось выявить только для выборки одновременного превышения ПДК на большей части постов (табл. 2).

Существенная синхронность превышения ПДК обнаружена только у диоксида азота с формальдегидом. Трендовые особенности характеризуются широким диапазоном малообъяснимых с точки зрения связи с динамикой погоды «выбросов» масштабов месяцев. Сезонность присутствует, но с нарушениями периодичности и монотонности. Серийность хорошо выражена у CO, NO₂ и формальдегида, но о периодичности речь не идет.

Синхронные годовые графики концентраций (рис. 4, 5) со сглаживанием асз-сплайнами (фильтрация высоких частот) подтверждают приведенные выводы, наглядно показывая неустойчивость потенциальных аппроксимаций трендов и сезонности, а также существенные различия динамики концентраций как по площади мегаполиса, так и по видам примесей.

Выборочные сезонные графики (рис. 6, 7) показывают, что, несмотря на некоторую схожесть сглаженных временных рядов концентраций примесей со спектром синоптического масштаба (3—10 дней), синхронность по территории города почти отсутствует, а высокочастотная составляющая (1—2 дня) колебаний преобладает. Это означает, что

Таблица 2

Закономерности превышения ПДК

Примесь	Синхронность	Тренд	Сезонность	Серийность
Фенол	Слабая	Рост с 2007 г.	Ноябрь — март, май	Неустойчивая
Аммиак CO	CO, неустойчивая	Нет	Март — июль	Июнь 2006 г.
NO ₂	Формальдегид	1—7/2008 г.	Нет	Высокая
Формальдегид	NO ₂	2008 г.	Весна — лето	»
Пыль	Нет	Мах 2006 г.	Апрель — июнь	Средняя
CO	»	Мах 2009 г.	Январь, март	Высокая
Сажа		12/2005 г.	Есть	

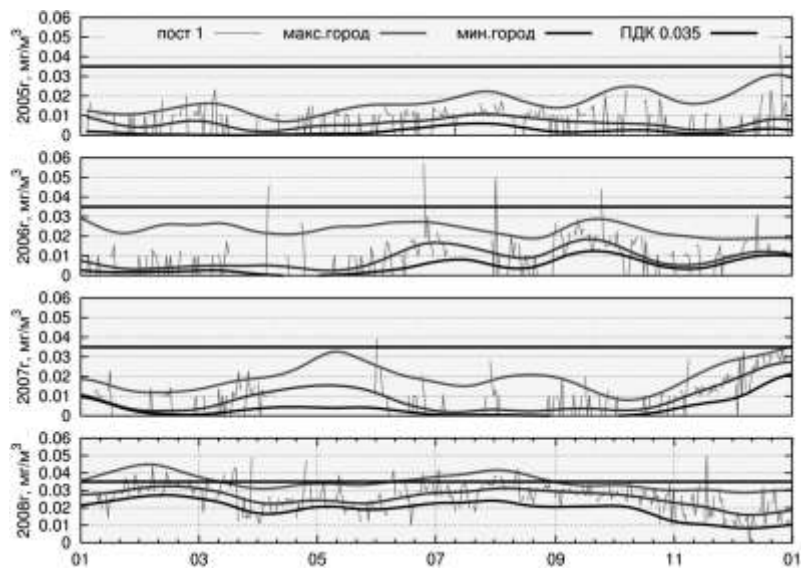


Рис. 4. Многолетний ход максимальной суточной концентрации формальдегида. Новосибирск, 2005—2008 гг.

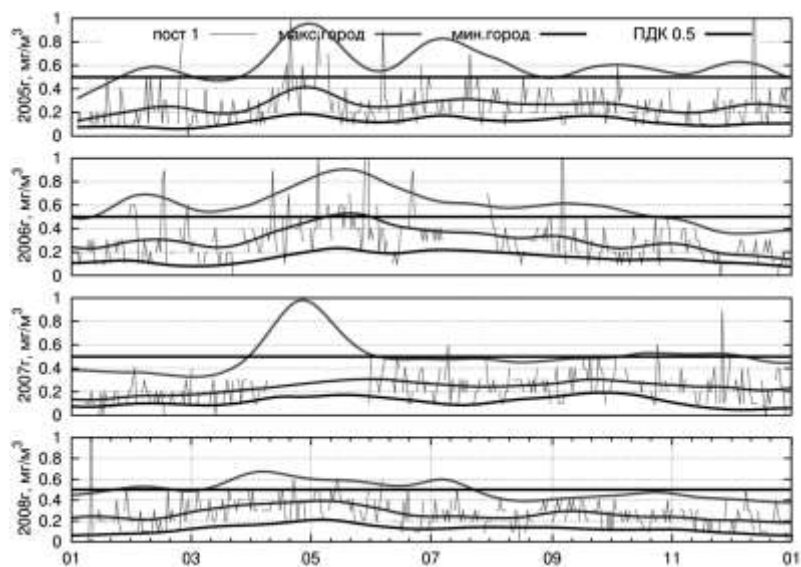


Рис. 5. Многолетний ход максимальной суточной концентрации пыли. Новосибирск, 2005—2008 гг.

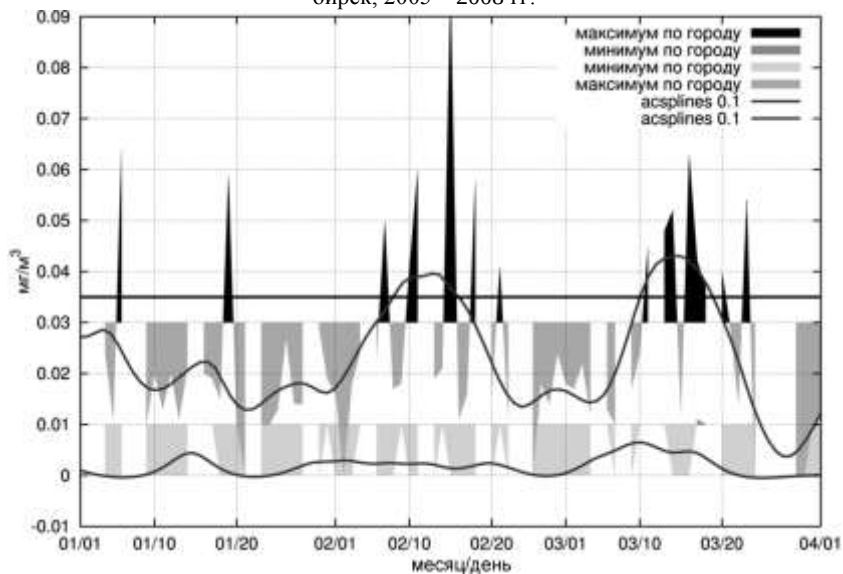


Рис. 6. Максимальная суточная концентрация формальдегида. Новосибирск, 2006 г.

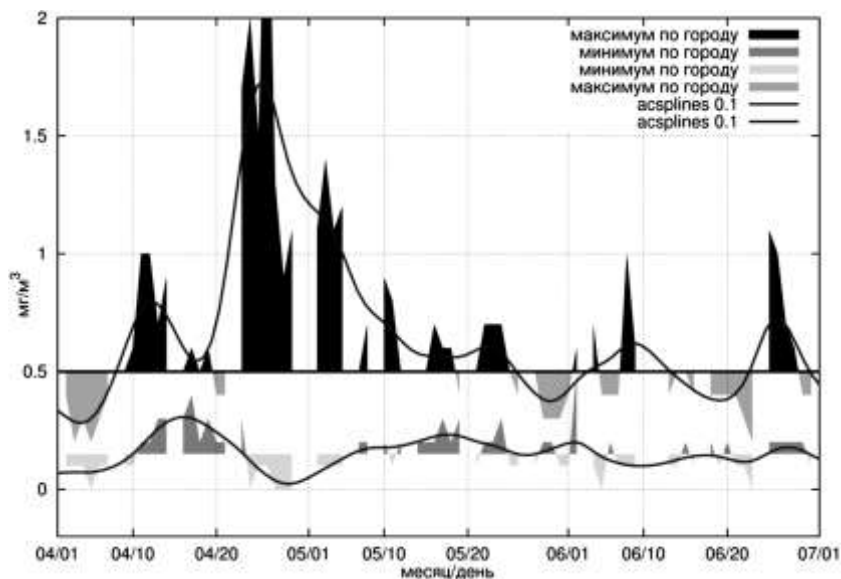


Рис. 7. Максимальная суточная концентрация пыли. Новосибирск, 2007 г. метеорологические факторы не являются определяющими для колебаний концентрации примесей рассматриваемой выборки, и выявление статистических связей с выходом на прогноз является чрезвычайно сложной задачей. В терминах цифровой обработки сигналов — это задача выделения слабого сигнала на фоне сильного шума. А по условиям нашей задачи это еще и многокомпонентный сигнал (набор примесей различной природы).

Теперь можно перейти к численным оценкам возможных пространственных и временных закономерностей в матрице данных. Пока только очевидно, что такие закономерности (если они значимы) неустойчивы и трудноуловимы, а подходящий математический аппарат не должен налагать на данные жестких априорных статистических требований.

Воспользуемся численными оценками условных вероятностных характеристик из теории дисперсионной идентификации [1]. Основой условных статистических оценок служит разложение дисперсии:

$$DY = DM(Y|x) + MD(Y|x), \quad (1)$$

где $DM(Y|x)$ определяет долю дисперсии Y за счет влияния X ; $MD(Y|x)$ — неопределенная (остаточная) дисперсия Y ; $D(Y|x) = M[Y - M(Y|x)]^2$ — дисперсия условного среднего (математического ожидания).

А безразмерной величиной связи будет $DM(Y|X)/DY$ — дисперсионное (корреляционное) отношение, мера (нелинейной) связи.

Приведенные выражения будем использовать для оценки нестационарности многолетних рядов концентраций примесей, сезонности и эргодичности (различия по территории, постам наблюдений). Рассмотрим сводные данные вычислений компонентов дисперсии (1, 2) концентраций примесей по пространственно-временным координатам (посты, годы, сезоны), приведенные в табл. 2. Тренд и сезонность оцениваются отдельно для максимумов и минимумов по городу, которые интерпретируются как точечный «выброс» и удаленный от источника «фон».

Доля дисперсии за счет пространственных различий (посты) максимальна для окиси азота и объясняет четверть мощности колебаний. У фенола пространственные различия незначительны (менее 1 %), остальные примеси укладываются в интервал 5—10 % (по фтористому водороду и сероводороду данные только по одному посту).

Трендовая компонента (межгодовые различия) является доминирующей (более 50 %) для «фоновых» концентраций окислов азота и формальдегида и весьма значительной (20—40 %) для максимумов по городу окиси азота и формальдегида. Несущественный тренд отмечен

для пыли и фтористого водорода, а для остальных примесей составляет 5—10 %.

Сезонность четко выражена у окиси углерода, двуокиси серы, а также пыли («фон») и в меньшей степени сажи. Остальные примеси почти не подвержены сезонности, а значит, не связаны с ТЭК.

Очевидно, что повышенная зависимость концентраций от места (поста) и года наблюдений (тренд) не имеет прямого отношения к погоде в рассматриваемой выборке данных.

Выводы

1. Формирование повышенных концентраций примесей мегаполиса и их рассеяние — многофакторный антропогенный процесс, в котором роль погодных условий не является преобладающей и ее выделение представляет сложную задачу типа распознавания слабого сигнала на фоне сильных помех, недоступную традиционным статистическим методам.

2. Сезонная периодичность и многолетний тренд концентраций примесей неустойчивы даже на короткой 4-летней выборке и не могут быть представлены функциональной статистической моделью для выделения актуальных с точки зрения прогноза колебаний синоптического масштаба (3—5 суток) (табл. 3).

Таблица 3

Компоненты дисперсионной идентификации примесей по пространственно-временным осям матрицы данных

Примесь	По городу				Посты			Тренд		Сезонность	
	Макс.	Мин.	Сред.	Дисп.		DM (Y/X)/ DY	DM (Y/X)/ DY	DM(Y/X)/DY		DM(Y/X)/DY	
	MY	MY	MY	DY	N			Выб- рос	Фон	Выб- рос	Фон
							%	%	%	%	%
Пыль	0,55405	0,12934	0,30519	0,04998	10	0,00293	5,86	2,71	2,24	6,95	13,96
SO ₂	0,01860	0,00136	0,00782	0,00026	6	0,00001	6,18	8,42	5,07	22,53	13,32
CO	4,78524	1,28747	2,58200	4,07565	10	0,27580	6,76	11,38	0,25	2,46	19,45
NO ₂	0,16659	0,03972	0,09193	0,00533	10	0,00030	5,66	12,62	53,07	2,62	0,61
NO	0,08238	0,02959	0,05714	0,00274	7	0,00066	24,32	37,35	51,67	1,80	0,85
H ₂ S	0,00046	0,00046	0,00046	0,00000	1	0,00000	0,00	5,05	5,05	0,46	0,46
Фенол	0,00740	0,00124	0,00415	0,00004	3	0,00000	0,47	11,80	10,21	0,42	0,37
Сажа	0,09714	0,00164	0,03330	0,00527	10	0,00038	7,38	0,67	4,26	7,49	9,87
HF	0,00763	0,00763	0,00760	0,00008	1	0,00000	0,00	1,49	1,49	3,21	3,21
Аммиак	0,13945	0,02303	0,07739	0,01305	3	0,00067	5,17	5,27	1,27	2,20	1,90
Форм	0,02357	0,00734	0,01525	0,00018	6	0,00001	10,65	21,87	52,55	0,47	0,86

Литература

1. *Дисперсионная идентификация* / Под ред. Н.С. Райбмана. М.: Наука, 1981. 336 с.

УДК 551.577.52

ОЦЕНКА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ДЛЯ ЗАДАЧ СОДЕРЖАНИЯ ФЕДЕРАЛЬНЫХ ДОРОГ НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ

Н.И. Белая, И.О. Лучицкая

*ГУ «Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт», г. Новосибирск*

Введение

Разработка и реализация общей государственной политики социально-экономического развития России и субъектов Федерации в части размещения по территории населения, социально-экономических объектов, транспортных систем, технических, топливных ресурсов опираются в значительной степени на климатические условия нашей страны. Современное общество становится все более зависимым от погодно-климатических факторов, особенно в таких областях, как сельскохозяйственное производство, водные ресурсы, транспорт, строительство и др. [1].

Сухопутный транспорт — автомобильный и железнодорожный, перевозит наибольшее количество грузов и пассажиров. Транспортные проблемы являются одними из самых насущных в экономике России. Это плохие дороги, износ основных технических фондов, ограниченность и перегруженность транспортных магистралей [2]. Помимо этого транспортный сектор является одним из крупнейших и быстро набирающих силу источников загрязнения окружающей среды, выбросы которого составляют 40—45 % общего объема выбрасываемых веществ в атмосферу.

В число мер по повышению экологических показателей транспортного движения входят не только усовершенствование автомобилей и переход к экологическим видам топлива, но и оптимизация прокладки маршрутов автомобилей, особенно грузовиков, и городское планирование перевозок [3].

Наибольшее влияние на работу дорожных служб оказывают погодные условия в зимний период, так как из-за снежных заносов и образования скользкости на поверхности автомобильных дорог резко затрудняется их эксплуатация. Обледенение дорожных покрытий (зимняя скользкость) резко снижает сцепление шин и увеличивает вероятность возникновения дорожно-транспортных происшествий [4]. Заснеженное покрытие дорог возникает при несвоевременной уборке снега с трасс. Поэтому одна из важнейших функций службы ремонта и содержания дорог в зимний период — это поддержание автомобильных дорог в состоянии, при котором обеспечивается проезд автомобилей с регламентированными скоростями и соблюдается удобство и безопасность движения [5, 6].

Мероприятия по поддержанию дорог в требуемом состоянии оказываются успешными и эффективными при условии оптимального с точки зрения экологической безопасности использования способов борьбы со скользкостью, планомерной и правильной организации системы хранения сертифицированных противогололедных материалов, контролируемых условий приготовления смесей, их транспортировки и распределения в соответствии с производственным заданием [7]. Применяемые материалы не должны увеличивать экологическую нагрузку на окружающую природную среду (зеленые насаждения) и оказывать токсичное воздействие на человека и животных, не должны вызывать увеличения агрессивного воздействия на металл, бетон, кожу, резину.

Существует несколько различных классификаций видов зимней скользкости искусственных покрытий, к которым относятся и дорожные покрытия. В основу каждой из них положены определенные понятия: процессы образования, структура отложений, физические свойства, внешние признаки, технологии работ по ликвидации. Существующие в России нормативные документы выделяют три вида скользкости: рыхлый снег, уплотненный снег и стекловидный лед [8]. Эта классификация позволяет легко определить каждый вид скользкости визуально, но она ориентирована на существующие технологии работ, в основе которых лежит ликвидация последствий влияния неблагоприятных метеорологических условий, а не их профилактика.

При переходе на более совершенные технологии организации работ по содержанию дорог в их основе должна лежать профилактика образования скользкости, предусматривающая учет изменения метеорологических условий для правильного выбора норм распределения и вида противогололедного материала. При более детальном учете погодных и дорожных условий все многообразие видов зимней скользкости искусственных покрытий Т.В. Самодурова [5, 6] делит на 6 групп:

- гололедица;
- иней, изморозь, «черный лед»;

- твердый, зернистый и ледяной налет;
- гололед и зернистая изморозь;
- снежный накат, оледенелый и тающий снег;
- рыхлый снег.

В этой классификации четко представлены метеорологические условия, сопутствующие образованию каждого из видов скользкости. Прогнозирование их количественных значений и анализ динамики изменения помогут предвидеть возникновение скользкости на дорожном покрытии и выбрать необходимые технологии работ для обеспечения безопасности движения. Данная классификация впервые была использована для оценки состояния дорожного покрытия на федеральных автомобильных трассах «Дон» (Москва — Ростов-на-Дону), «Крым» (Москва — Белгород) и «Холмогоры» (Москва — Вологда) [9]. В настоящей работе выполнена оценка различных видов скользкости на участках федеральных автомобильных трасс Новосибирской области: М51 (Новосибирск — Татарск), М52 (Новосибирск — Посевная) и М53 (Новосибирск — Болотное).

Вид скользкости, который может образовываться на дорожном полотне, оценивался по критериям, представленным в Руководстве по специализированному климатологическому обслуживанию экономики [7].

В работе использованы ежедневные данные восьмисрочных наблюдений за осадками, температурой и влажностью воздуха, атмосферными явлениями 11 станций наблюдательной сети Росгидромета, расположенных вблизи автомобильных трасс, за период с 1985 по 2007 г.

Обработка данных включала:

- расчет числа случаев различных видов скользкости;
- оценку числа снегопадов, их продолжительности, количества и интенсивности выпавших твердых осадков (снега и мокрого снега);
- распределение снегопадов по градациям в зависимости от количества осадков и температуры воздуха;
- выборку сильных снегопадов и расчет их интенсивности.

Физико-географическое описание участков федеральных автомобильных трасс

Участок федеральной автомобильной трассы М51 Новосибирск — Татарск протекает по равнинной территории Западно-Сибирской низменности. К особенностям рельефа можно отнести наличие вытянутых с северо-востока на юго-запад невысоких (5—6 м) возвышенностей, так называемых грив, особенно характерных для Барабинской степи. По-

мимо грив «равнинность» рельефа нарушается более или менее обширными плоскими озерными впадинами; некоторые из них формируют небольшие замкнутые бассейны озер Чаны, Убинское, Сартлан. Вдоль трассы расположено 7 метеорологических станций, приуроченных в основном к железнодорожному полотну. От автотрассы они находятся примерно на расстоянии 3—8 км, их высота над уровнем моря не превышает 150 м.

Трасса М52, называемая Чуйский тракт, на участке Новосибирск — Искитим — Посевная проходит по северо-восточным отрогам Салаирского кряжа. Здесь Западно-Сибирская низменность приобретает явно выраженный волнистый характер с разностью высот 250—300 м. Место грив, характерных для левого берега р. Оби, занимают увалы, постепенно поднимающиеся в восточном направлении и переходящие в холмистые предгорья Салаирского кряжа и Кузнецкого Алатау. На территории прохождения автотрассы находятся две метеорологические станции.

И, наконец, трасса М53 (Новосибирск — Мошково — Болотное) расположена на территории междуречья Оби и Томи, характерным для которой является наличие сравнительно невысоких степных увалов Салаирского кряжа, который на юге сближается с Кузнецким Алатау, образуя район Горной Шории. Станции Мошково и Болотное расположены на наветренных склонах увалов Салаирского кряжа.

В заключение кратко отметим, что на рассматриваемой территории в течение всего года атмосферные осадки определяются ходом синоптических процессов, свойственных Западной Сибири. Для зимних условий характерным является развитие западного отрога азиатского антициклона. Зимний характер циркуляции атмосферы устанавливается с ноября и сохраняется до марта. Первые два месяца зимы отличаются значительно большей повторяемостью циклонических процессов по сравнению со второй ее половиной, характеризующейся холодной и ясной антициклональной погодой. Кроме общих процессов циркуляции, свойственных всей территории, большое значение при распределении осадков имеет формирование обособленных климатических комплексов, зависящих от свойств подстилающей поверхности. Экспозиция склонов гор и возвышенностей, обилие заболоченных пространств, широкие речные долины, залесенность, наличие грив, котловин — все это ведет к нарушению зональности, вызывая местные процессы циркуляции. Количество осадков возрастает на наветренных склонах возвышенностей, в залесенных районах. Во все зимние месяцы возможны оттепели, но они кратковременны и наблюдаются не ежегодно.

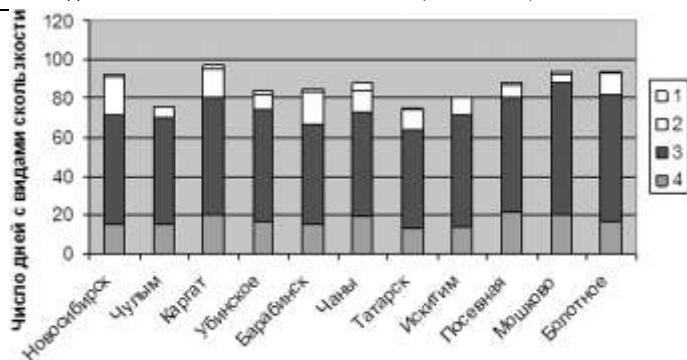


Рис. 1. Число дней с различными видами скользкости.

- 1 — черный лед и зернистая изморозь; 2 — иней и кристаллическая изморозь;
3 — снежный накат и рыхлый снег; 4 — гололедица и гололед

Результаты и их обсуждение

Анализ числа видов скользкости показал, что общее число дней со всеми видами на федеральных трассах Новосибирской области варьирует в пределах 70—95 дней (рис. 1). На всех направлениях чаще всего скользкость образуется во время снегопадов (рыхлый снег и снежный накат). Число дней со снежными отложениями увеличивается при продвижении от западных районов Новосибирской области к юго-восточным и северо-восточным. Так, в Татарске, Чанах, Барабинске отмечается около 50, в Искитиме и Посевной 55, в Мошково и Болотном 65 дней с видами скользкости, которым сопутствуют атмосферные осадки.

Второе место по повторяемости занимает гололед и гололедица, являющиеся самыми опасными видами скользкости. Наибольшее число дней в году с гололедными отложениями наблюдается на отдельных участках всех трасс в районе станций Каргат, Чаны, Мошково, Посевная (около 20 дней).

Иней и кристаллическая изморозь на дорожном покрытии образуются реже, чем вышеперечисленные виды скользкости, и варьируют на рассматриваемых трассах в пределах 3—10 дней.

Повторяемость отложений в виде «черного льда» и зернистой изморози на федеральных дорогах гораздо меньше по сравнению с другими видами (2—4 дня), что обусловлено достаточно редкой повторяемо-

стью интенсивных оттепелей (потепление на 6 °С и более за 6 ч и менее).

Проведенный анализ числа дней с видами скользкости показал, что наиболее часто неблагоприятные для автотранспорта условия создаются при выпадении зимних осадков (снега и мокрого снега), в связи с этим в работе более детально рассмотрены характеристики снегопадов. Среднее число снегопадов за сезон, их средняя и суммарная продолжительность, количество выпавших при этом осадков представлено в табл. 1.

Таблица 1

**Характеристики снегопадов (снег, мокрый снег)
на федеральных трассах Новосибирской области**

Станция	Число снегопадов	Количество твердых осадков, мм	Суммарная продолжи- тельность снегопадов, ч	Средняя продолжи- тельность, ч
Трасса М51				
Новосибирск	91	158	1007	11,1
Коченево	95	142	743	7,8
Чулым	86	122	910	10,6
Каргат	101	151	815	8,1
Убинское	93	120	765	8,2
Барабинск	100	140	413	4,1
Чаны	93	123	570	6,1
Татарск	80	128	652	8,2
Трасса М52				
Искитим	96	172	939	9,8
Посевная	103	172	841	8,2
Трасса М53				
Мошково	107	211	980	9,2
Болотное	122	207	932	7,7

Среднее число снегопадов на участках федеральных трассах М51 и М52 составляет 90—100 дней, на федеральной трассе М53 их число возрастает до 110—120 (Мошково и Болотное). Количество твердых осадков изменяется от 120—150 мм на федеральной трассе М51 до 170 на трассе М52 и до 210 мм на трассе М53. Суммарная продолжительность снегопадов за сезон также увеличивается к юго-востоку и северо-востоку, но не всегда большему числу снегопадов соответствует большая суммарная продолжительность. Средняя за сезон продолжи-

тельность снегопадов изменяется от 4,1 ч в Барабинске до 11,1 ч в Новосибирске. Обращают внимание снегопады в г. Новосибирске. Здесь количество осадков, средняя и суммарная длительность превосходят эти же характеристики по сравнению с другими станциями, расположенными вдоль трассы М51. Связано это, по-видимому, с островом тепла, образующимся над городом, и, как следствие, более частым образованием внутримассовой конвективной облачности.

В большинстве случаев (60—90) для всех трасс характерны слабые снегопады с количеством осадков до 2 мм, в 20—25 случаях за сезон отмечаются снегопады с осадками 2—10 мм, и лишь в Мошково и Болотном их число достигает 29—30 случаев. Снегопады с количеством осадков более 10 мм встречаются гораздо реже, в основном 1—2 случая за сезон (рис. 2).

Выпадение атмосферных осадков в целом на территории Новосибирской области связано главным образом с циклонической деятельностью, особенно в первую половину зимнего сезона, а их распределение по территории в значительной степени определяется особенностями местоположения станции [10]. Отмеченное увеличение числа, продолжительности и количества осадков, особенно в северо-восточном направлении (Мошково и Болотное), объясняется расположением этих станций на западных наветренных склонах Салаирского кряжа, которые являются первыми более возвышенными областями, расположенными на пути сравнительно влажных воздушных масс воздуха, смещающихся с запада, и задерживающими большую часть влаги.

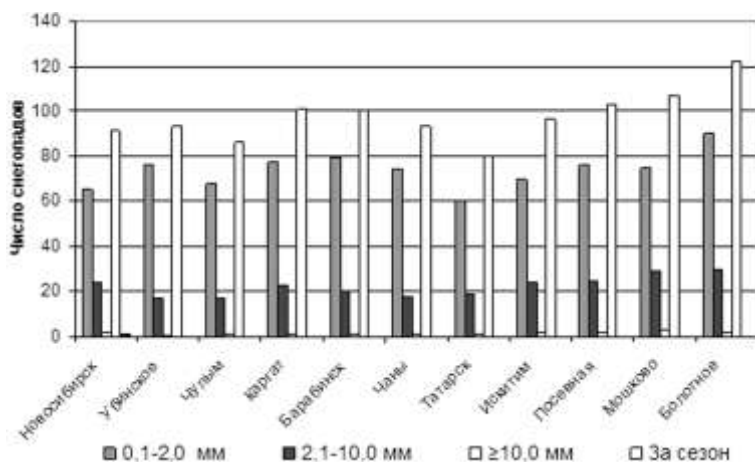


Рис. 2. Число снегопадов за сезон по градациям количества осадков

Чтобы рассчитать среднее число обработок дорожного полотна за снегопад и нормы противогололедных материалов для отдельных участков и дорог в целом, а также затраты на уборку снега необходимы данные о числе снегопадов и их продолжительности при различных температурах воздуха.

Как показал анализ, за рассматриваемый период наиболее частые и продолжительные снегопады с большим количеством осадков наблюдаются при температуре от 0 до -5°C (табл. 2, 3). Именно в этом интервале температур часто происходит образование стекловидного обледенения (снежного наката и замерзшего снега). При понижении температуры воздуха до $-10...-15^{\circ}\text{C}$ значительно уменьшается количество осадков в весенне-осенние месяцы.

Таблица 2

**Месячное и сезонное количество (мм) твердых осадков
(снега и мокрого снега) в зависимости от температуры воздуха**

Месяц	Температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$						Месяц
	0...2	0...-5	-5,1... -10	-10,1... -15	-15,1... -20	<-20	

**Трасса М51
Новосибирск**

X	11,9	8,2	0,6	0,0	0,0	0,0	20,7
XI	5,0	11,9	8,2	3,9	1,5	0,8	31,3
XII	0,4	9,0	8,7	7,9	4,1	1,0	31,2
I	0,2	4,4	7,8	5,6	4,7	2,6	25,2
II	0,4	4,0	5,7	4,9	2,2	0,7	18,0
III	3,1	6,7	3,8	1,9	0,2	0,2	16,0
IV	4,9	5,7	1,5	0,3	0,0	0,0	12,4
Сезон	26,1	49,9	36,4	24,4	12,7	5,2	154,8

**Трасса М52
Искитим**

X	13,3	9,7	0,7	0,1	0,0	0,0	23,8
XI	6,2	14,5	8,4	4,4	0,9	0,5	35,0
XII	0,7	9,9	13,0	7,0	2,4	0,9	33,8
I	0,5	5,0	7,3	8,4	3,3	2,2	26,7
II	0,3	4,1	6,6	5,2	2,2	0,4	18,8
III	3,6	6,8	4,6	1,5	0,3	0,1	16,9
IV	6,0	6,8	0,6	0,5	0,0	0,0	13,9
Сезон	30,7	56,7	41,2	27,1	9,0	4,1	168,9

**Трасса М53
Болотное**

X	11,7	20,0	0,9	0,1	0,0	0,0	32,8
---	------	------	-----	-----	-----	-----	------

XI	4,0	16,4	10,1	5,2	1,5	0,9	38,1
XII	0,5	9,4	14,9	7,4	4,0	1,8	38,1
I	0,8	4,5	4,0	8,0	3,2	3,0	28,6
II	0,4	4,8	7,4	5,3	2,4	0,5	20,8
III	3,5	10,5	6,4	2,2	0,2	0,0	22,9
IV	8,6	11,5	1,3	0,2	0,0	0,0	21,7
Сезон	29,5	77,2	50,0	28,4	11,4	6,3	202,9

Т а б л и ц а 3

Суммарная продолжительность (верхняя строка) и число снегопадов (нижняя строка) в зависимости от температуры воздуха

Станция	Температура воздуха, °С					
	0...2	0...-5	-5,1...-10	-10,1...-15	-15,1...-20	<-20
Трасса М51						
Новосибирск	64,4	240,4	283,4	212,4	136,4	65,6
	12	27	20	14	10	7
Чулым	47,3	249,1	277,0	190,5	95,4	47,2
	9	25	21	15	9	6
Каргат	45,4	218,5	236,5	176,5	88,1	46,2
	10	27	24	18	12	8
Убинское	42,1	205,4	217,2	154,5	88,3	55,37
	8	27	23	17	11	
Барабинск	25,6	116,3	126,2	78,5	43,4	22,0
	9	29	26	18	11	6
Чаны	27,3	151,2	159,3	117,2	79,1	35,2
	7	26	24	17	11	6
Татарск	32,3	162,1	189,3	141,6	85,4	39,3
	8	22	20	15	10	6
Трасса М52						
Искитим	64,1	260,3	278,1	198,3	9,1	42,6
	12	29	23	16	9	7
Посевная	32,5	252,2	265,4	197,3	71,2	20,5
	8	33	28	20	9	3
Трасса М 53						
Мошково	55,1	273,0	297,6	208,1	90,2	53,3
	10	32	27	19	11	7
Болотное	60,1	270,0	278,3	187,3	92,0	40,5
	13	35	31	21	13	7

Характерной особенностью для станций всех трасс является то, что наибольшее количество осадков выпадает за период октябрь—декабрь.

Как было отмечено ранее, циклоническая деятельность, обуславливающая образование осадков, наиболее интенсивно развита именно в первую половину зимы. При температуре воздуха ниже -20°C число снегопадов не превышает 10 случаев, количество осадков уменьшается до 4—6 мм.

В оперативной работе дорожных служб крайне важна информация об интенсивности снегопадов (количество осадков, выпавших за единицу времени). При интенсивности осадков 1—3 мм/ч и более (1 мм слоя воды в среднем равен 1 см свежевывавшего снега) к распределению противогололедных материалов приступают через 15—20 мин после начала снегопада, а при более слабых осадках (0,5—1 мм/ч) — через 30—40 мин.

Данные табл. 4 свидетельствуют о преобладающей повторяемости (более 98 %) снегопадов с интенсивностью 0—1 мм/ч, и лишь в Баранбинске она несколько меньше, т. е. здесь чаще отмечаются более интенсивные снегопады.

Снегопады, при которых за период времени не более 12 ч выпадает 7—19 мм осадков, считаются сильными и относятся к неблагоприятным метеорологическим явлениям. Снегопады, при которых за такой же период времени выпадает 20 мм осадков и более, считаются очень сильными и относятся к опасным явлениям. Интенсивность снегопада является очень важной характеристикой для дорожных служб. С ее увеличением резко возрастает опасность ДТП и усложняются работы по поддержанию проезжей части дороги в безопасном для автотранспорта состоянии. Оценка средней интенсивности сильных и очень сильных снегопадов представлена в табл. 5.

Т а б л и ц а 5

**Характеристика сильных снегопадов
(продолжительность не более 12 ч)**

Станция	Среднее число снегопа- дов с ко- личест- вом осад- ков ≥ 7 мм	Макси- мальное количест- во осад- ков за снегопад, мм	Общее чис- ло опасных снегопадов (с количест- вом осадков ≥ 20 мм)	Интен- сивность снегопада (наибольш- шая из средних), мм	Общее число случаев с интенсив- ностью снегопада	
					≥ 1 мм/ч	≥ 2 мм/ч
Трасса М51						
Новосибирск	0,8	13,1	—	1,8	8	—
Убинское	1,0	12,4	—	2,8	11	2
Чулым	1,3	18,8	—	2,3	20	4

Т а б л и ц а 4

Повторяемость (%) интенсивности снегопадов

Станция	Градация интенсивности, мм/ч	
	0—1	$\geq 1,1$
Трасса М51		
Новосибирск	98,6	1,4
Чулым	98,8	1,2
Каргат	98,7	1,3
Убинское	98,7	1,3
Барабинск	95,4	4,6
Чаны	98,8	1,2
Татарск	98,5	1,5
Трасса М52		
Искитим	98,0	2,0
Посевная	99,0	1,0
Трасса М53		
Мошково	98,5	1,5
Болотное	98,7	1,3
Каргат	1,2	14,4

Труды СибНИГМИ, выпуск 106

Барабинск	1,0	18,3	—	2,2	19	3
Чаны	1,2	14,5	—	1,5	10	—
Татарск	1,0	15,6	—	2,2	11	1

Трасса М52

Искитим	1,3	15,0	—	2,5	13	1
Посевная	1,3	21,6	1	2,4	14	2

Трасса М53

Мошково	1,8	15,9	—	2,9	20	6
Болотное	1,6	16,7	—	2,1	13	1

Установлено, что снегопады с количеством осадков 7—19 мм — явление довольно редкое на всех трассах, в среднем 1—2 случая за сезон, опасные снегопады (20 мм) наблюдались только один раз за 23 года на ст. Посевная. Максимальная интенсивность на рассматриваемых трассах варьирует в пределах 1,5—2,9 мм/ч. Число снегопадов с интенсивностью ≥ 1 мм/ч составляет не более 1 случая в год, осадки с интенсивностью ≥ 2 мм/ч отмечались 1—4 раза за весь рассматриваемый период практически на всех станциях.

Заключение

Для оценки экономической целесообразности принятия решений на стадии проектирования и планирования затрат на содержание дорог важен учет ресурсов климата. Наибольшее влияние на работу дорожных служб оказывают погодные условия в зимний период, так как из-за снежных заносов и образования скользкости на поверхности автомобильных дорог резко затрудняется их эксплуатация.

Выполнена оценка видов скользкости на федеральных трассах Новосибирской области, формирующейся под влиянием комплекса метеорологических условий (температура и влажность воздуха, атмосферные осадки, атмосферные явления). Чаще всего неблагоприятные условия для работы автомобильного транспорта создают рыхлый снег и снежный накат. Повторяемость дней со снежными отложениями уменьшается при продвижении с северо-востока на запад. Гололед и гололедица, являющиеся наиболее опасным видом скользкости, занимают второе место по повторяемости. Реже всего образуются отложения в виде «черного льда» и зернистой изморози. По общей совокупности характеристик скользкости наиболее неблагоприятные условия для работы автомобильного транспорта создаются на трассе М53 (Новосибирск — Мошково — Болотное).

Самое большое количество твердых осадков выпадает также на трассе Мошково — Болотное, что объясняется влиянием подстилающей поверхности (наветренные склоны Салаирского кряжа). Снегопады на всех трассах характеризуются длительной суммарной продолжительностью, но слабой интенсивностью. На всех трассах сильные снегопады отмечаются не более 1—2 раза за сезон, очень сильные практически не наблюдаются.

Литература

1. *Кобышева Н.В.* Энциклопедия климатических ресурсов Российской Федерации. СПб.: Гидрометеиздат, 319 с.
2. *Руководство по специализированному климатологическому обслуживанию.* СПб.: Астерион, 2008. 334 с.
3. *Васильев А.П.* Проектирование дорог с учетом влияния климата на условия движения. М.: Транспорт, 1986. 248 с.
4. *Васильев А.П., Ушаков В.В.* Анализ современного зарубежного опыта зимнего содержания дорог и разработка предложений по его использованию в условиях России. Мин-во трансп. Российской Федерации, Гос. служба дор. хоз-ва (Росавтодор), 2003. 60 с.
5. *Самодурова Т.В.* За безопасность движения. Специализированное метеорологическое обеспечение в системе управления зимним содержанием дорог // Дороги России XXI века. 2002. № 1. С. 96—97.
6. *Самодурова Т.В.* Метеорологическое обеспечение зимнего содержания автомобильных дорог. М.: Ассоциация «Радор», 2003. 183 с.
7. *Рекомендации по обеспечению экологической безопасности в придорожной полосе при зимнем содержании автомобильных дорог.* Изд. Офиц. Мин-во трансп. Российской Федерации. Гос. служба дор. хоз-ва (Росавтодор). М., 2003. 44 с.
8. *Технические правила ремонта и содержания автомобильных дорог:* ВСН 24-88 / Минавтодор РСФСР. М., 1988. 198 с.
9. *Псаломщикова Л.М., Салль И.А., Стадник В.В., Трофимова О.В.* Использование метеорологической информации в целях содержания автомобильных дорог в зимний период // Труды ГГО. Вып. 557. С. 85—101.
10. *Агроклиматические ресурсы Новосибирской области.* Л.: Гидрометеиздат, 1971. 155 с.

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОЛЕЙ ВЫПАДЕНИЙ ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПЕПЛА ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ

Т.В. Ярославцева¹, В.Ф. Рапута²

¹ГУ «Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт», г. Новосибирск

²Институт вычислительной математики и математической
геофизики СО РАН, г. Новосибирск

Введение

Воздействие крупнейших вулканических извержений на природную среду происходит прежде всего за счет значительных выбросов в атмосферу пеплового материала, газов и аэрозолей. Для изучения их влияния в региональном и глобальном масштабах необходимо выявить все эти извержения, опираясь на изучение вулканических отложений и форм рельефа, реконструировать параметры извержений, включая возраст, а также объем и состав вулканических продуктов [1—4].

Вулканические извержения могут влиять на климат в регионах, расположенных далеко за пределами зоны выпадения кислотных дождей. Газ или пепел от вулканической колонны, проникающий в стратосферу, разносится на большие расстояния высотными воздушными течениями. Частицы пепла и аэрозольные капли поглощают солнечный свет, что приводит к понижению температуры на Земле и в нижних слоях атмосферы. Таким образом, крупное вулканическое извержение нагревает верхние слои атмосферы, где происходит абсорбция, но охлаждает поверхность и нижнюю часть атмосферы. Микроскопические частицы пепла, выброшенные в стратосферу, осаждаются примерно за три месяца, но аэрозольные капли серной кислоты могут плавать в воздухе в течение нескольких лет. Таким образом, крупные извержения, связанные с мощными выбросами двуокиси серы, оказывают наиболее значительное и устойчивое влияние на климат [5].

В связи с вышесказанным проблема определения количественных характеристик отложений вулканического пепла в результате извержений вулканов является весьма актуальной. Применение методов прямого моделирования распространения примесей в атмосфере от такого типа источников сталкивается со значительными затруднениями, по-

скольку прямые измерения состава и массы выбрасываемых вулканом веществ практически невозможны. Эти трудности усугубляются изменениями параметров источника на разных фазах индивидуального извержения. С другой стороны, современные знания о характеристиках вулканических выбросов основаны на косвенных экспериментальных исследованиях их состава на поверхности, в тропосфере и стратосфере, что приводит к необходимости соответствующих постановок обратных задач переноса примеси в атмосфере [6, 7].

Результаты экспериментальных исследований отложений пепла в окрестностях вулкана Чикирачки (о. Парамушир, Курильские острова)

Вулкан Чикирачки является одним из наиболее активных вулканов Курильской дуги. Мощные его извержения за исторический период происходили дважды — в 1853 и 1986 гг. Высоты подъема колонн выброса примесей достигали 13—14 км при скоростях ветра 35—40 и 15 м/с соответственно. Продолжительность высотных стадий извержения составила 5—7 ч [3]. Спутниковые изображения показывают, что при извержении 1986 г. пепловый шлейф уходил на расстояние до 600 км от вулкана, ширина шлейфа варьировалась от 30 до 160 км. Общая площадь пеплопада за весь период извержения превысила 100 тыс. км.

Выпадения пеплового материала высотных стадий извержений 1853 и 1986 гг. обладают большой толщиной и хорошо сохранились в разрезах почвы. Отложения пепла в обоих случаях очень похожи. Результаты измерений толщины слоя пепла в зонах выпадений приведены на рис. 1 и 2. Гистограммы гранулометрического состава одномодальны. Отложения хорошо сортированы. Средний размер частиц пепла и суммарная мощность слоя уменьшаются с удалением от вулкана. Пепловый материал 1853 г. несколько грубее и лучше сортирован, чем пепел 1986 г. Высокая пористость выпавшего материала и хорошая сортировка пепловых частиц свидетельствуют о чисто магматической природе извержений [1, 4].

Постановка обратной задачи переноса в атмосфере полидисперсной примеси

Результаты проведенных экспедиционных исследований показали, что выпадение пепла в исследуемых зонах о. Парамушир в основном произошло в составе крупных фракций частиц, обладающих весьма

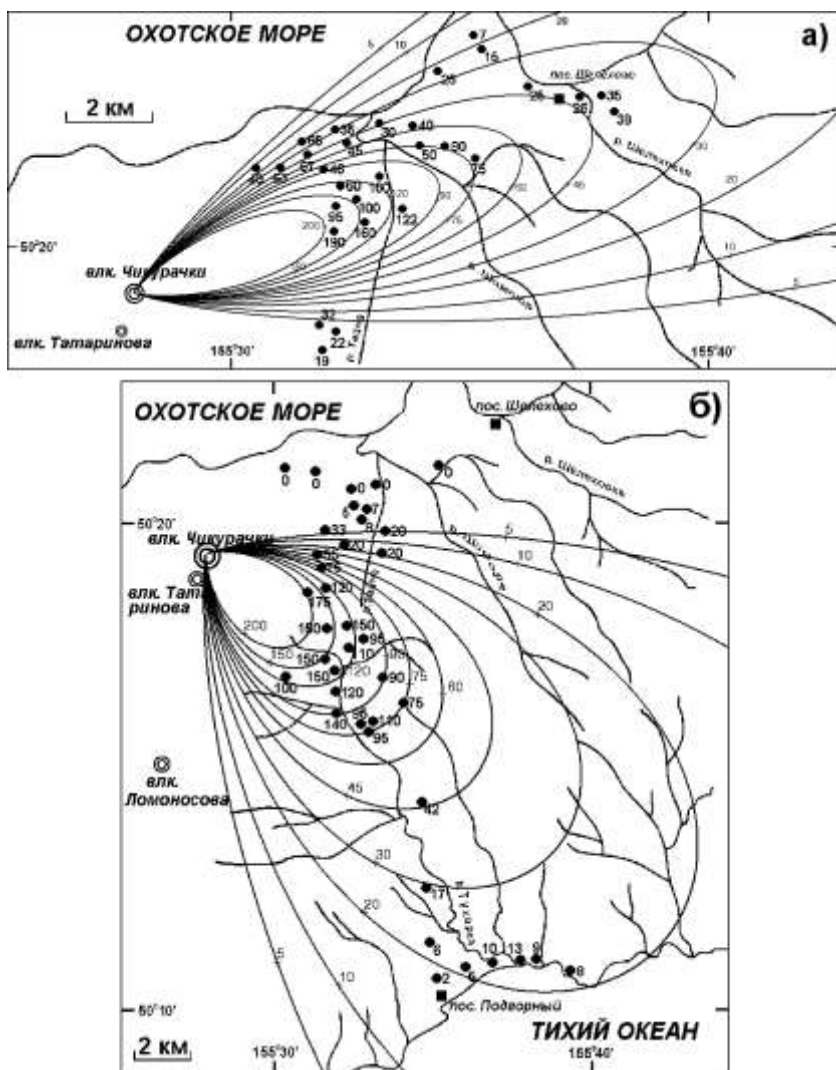


Рис. 1. Схемы отбора проб тефры в окрестностях вулкана Чикурачки: извержение 1853 г. (а) и 1986 г. (б). Восстановленные по модели (5) поля выпадений.

● — точки пробоотбора, цифры рядом — толщина слоя пепла (см)

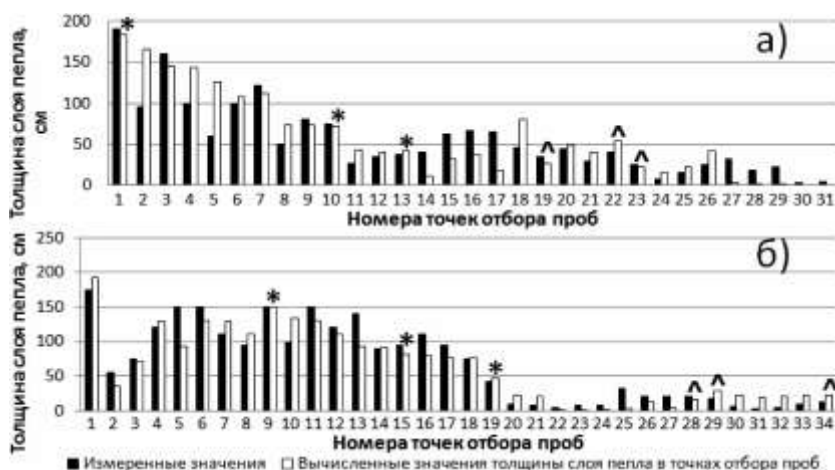


Рис. 2. Измеренные и численно восстановленные толщины слоев выпадений тифры в точках проботбора: извержение 1853 г. (а) и 1986 г. (б)

значительными скоростями оседания в атмосфере [1, 4]. Данное обстоятельство дает возможность при построении модели оценивания полей выпадений в зоне нескольких десятков километров ограничиться кинематической схемой оседания частиц пепла в направлении оси x , совпадающей с горизонтальным направлением ветра. В этом случае справедливо следующее соотношение:

$$\frac{H}{w} = \frac{x}{U}. \quad (1)$$

Здесь H — эффективная высота подъема факела; w — скорость оседания определенной фракции частиц; x — расстояние от вулкана, на котором происходит выпадение рассматриваемой фракции на подстилающую поверхность; U — средняя скорость ветра в слое оседания.

Турбулентную диффузию частиц в поперечном к ветру направлении опишем следующим выражением [8]:

$$f(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\varphi_0 x} e^{-\frac{y^2}{2\varphi_0 x^2}}, \quad (2)$$

где φ_0 — дисперсия отклонений направления ветра за период времени T .

Распределение аэрозольной примеси в источнике по скоростям оседания w зададим в виде двухпараметрической функции [9, 10]

$$N(w) = \frac{a^{n+1}}{\Gamma(n+1)} w^n e^{-aw}, \quad n \geq -1, \quad a = \frac{n}{w_m}, \quad (3)$$

где параметр w_m характеризует скорость преобладающей по количеству частиц фракции примеси; n — степень однородности распределения частиц пепла по скоростям w ; $\Gamma(n)$ — гамма-функция Эйлера.

С учетом (1), (2) количество полидисперсной примеси, выпадающей на расстоянии x , можно оценить с помощью соотношения

$$P(x) = Q \cdot N\left(\frac{UH}{x}\right). \quad (4)$$

Здесь Q — количество пеплового материала, выброшенного за время активной фазы извержения.

Тогда с учетом (1)–(4) количество пепла, выпавшего в точке с координатами x, y , можно оценить с помощью соотношения

$$P(x, y, \bar{\theta}) = \theta_1 x^{\theta_2} \exp\left(-\frac{\theta_3}{x} - \frac{\theta_4 y^2}{x^2}\right), \quad (5)$$

где

$$\theta_1 = \frac{Q a^{n+1} U H^n}{\sqrt{2\pi\phi_0} \Gamma(n+1)}, \quad \theta_2 = -n-1, \quad \theta_3 = aUH, \quad \theta_4 = \frac{1}{2\phi_0^2}.$$

Оценка неизвестного вектора параметров $\bar{\theta}$ проводится с использованием метода наименьших квадратов [11, 12]. Минимизируется следующий функционал:

$$J(\bar{\theta}) = \sum_{j=1}^M \sigma_j^{-2} \left[r_j - P(x_j, y_j, \bar{\theta}) \right]^2 \rightarrow \min_{\bar{\theta} \in \Omega}. \quad (6)$$

Здесь r_j — измеренный уровень выпадений пепла в точке x_j ; σ_j — дисперсия ошибки измерения; Ω — область допустимых значений вектора $\bar{\theta}$.

**Численная реконструкция полей выпадений пепла
от извержений вулкана Чукурачки 1853 и 1986 гг.**

На основе имеющихся данных наблюдений [1, 4] и модели (5) по ограниченному числу опорных точек проведена реконструкция следа выпадений, представленная на рис. 1.

Оценивание параметров θ_1 , θ_2 , θ_3 с помощью модели (5) в обоих случаях проводилось по трем опорным точкам измерений, достаточно близко расположенным к осям пеплопадов. Для оценивания параметров θ_4 также использовались три опорные точки измерений, расположенные на различных расстояниях от осей. На диаграммах рис. 2 номера этих точек помечены соответственно звездочками и крышечками. Результаты численного восстановления полей выпадений пепла приведены на рис. 1, 2. Оценки параметров θ_2 , θ_3 оказались довольно близкими для обоих извержений. Оценки же θ_4 заметно отличаются, что объясняется различием в скоростях ветра во время извержений. Соответственно, это отличие проявилось в меньшей вытянутости изолиний на рис. 1, б относительно оси. Анализ рис. 2 показывает вполне удовлетворительное согласие между измеренными и численно восстановленными значениями толщины слоя пеплового материала в точках отбора проб, прилегающих к осям пеплопада. В точках отбора проб, расположенных на периферии следов выпадений, расхождения становятся более заметными, что может быть связано как с относительно большими погрешностями измерений, так и с влиянием колебаний факела выбросов.

В заключение следует отметить, что разработанная малопараметрическая модель реконструкции выпадений полидисперсной примеси дает возможность численного анализа данных наблюдений для ближней части следа. Для восстановления поля выпадений может быть использовано весьма ограниченное число точек измерений, что создает определенные преимущества при анализе имеющихся данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Президиума РАН № 4.4, ИП СО РАН № 84.

Литература

1. Белоусов А.Б., Белоусова М.Г., Гришин С.Ю., Крестов П.В. Исторические извержения вулкана Чикурачки (о. Парамушир, Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 2003. № 3. С. 15—34.
2. Лучицкий И.В. Основы палеовулканологии. М.: Наука, 1971. Т. 1. 480 с.
3. Мархинин Е.К. Вулканизм. М.: Недра, 1985. 288 с.
4. Овсянников А.А., Муравьев Я.Д. Извержение вулкана Чикурачки в 1986 г. // Вулканология и сейсмология. 1992. № 5-6. С. 3—20.

5. *Асатуров М.Л., Будыко М.И., Винников К.Я. и др.* Вулканы, стратосферный аэрозоль и климат Земли. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 256 с.
6. *Израэль Ю.А., Цатуров Ю.С., Назаров И.М.* Реконструкция фактической картины радиоактивного загрязнения местности в результате аварий и ядерных испытаний // Метеорология и гидрология. 1994. № 8. С. 5—18.
7. *Рапута В.Ф., Крылова А.И.* Обратная задача получения оценок параметров источника примеси в пограничном слое атмосферы // Метеорология и гидрология. 1995. № 3. С. 49—58.
8. *Берлянд М.Е.* Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 448 с.
9. *Петров В.Н., Прессман А.Я.* Оценка влияния турбулентного рассеяния по вертикали и в направлении ветра на распространение полидисперсной примеси // Докл. АН СССР. 1962. Т. 146, № 1. С. 86—88.
10. *Прессман А.Я.* О распространении в атмосфере тяжелой неоднородной примеси из мгновенного точечного источника // Инж.-физ. журн. 1959. Т. 2, № 3. С. 78—87.
11. *Успенский А.Б., Федоров В.В.* Вычислительные аспекты метода наименьших квадратов при анализе и планировании регрессионных экспериментов. М.: Изд-во МГУ, 1975. 168 с.
12. *Федоров В.В.* Теория оптимального эксперимента. М.: Наука, 1971. 312 с.

**ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ, ЦИРКУЛЯЦИИ
И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПОГОДЫ
В ЦЕНТРАЛЬНОМ РАЙОНЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ
В РАЗНЫЕ ПЕРИОДЫ ГОДА**

Т.В. Давидович, Л.Е. Каминская, Э.А. Морозова

*ГУ «Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт», г. Новосибирск*

Территория исследования, ограниченная 58—65° с. ш. и 60—85° в. д., находится на Западно-Сибирской равнине, которая не является идеальной низменностью. Холмы и Сибирские Увалы, средняя высота которых над уровнем моря составляет 160—180 м, вытянуты в широтном направлении и чередуются с сильно заболоченными местами. Ограниченность Западно-Сибирской равнины с запада, юго-востока и востока горными системами Урала, Алтая, Среднесибирского плоскогорья и открытость ее к Северному Ледовитому океану на севере и обширным пространствам Казахстана на юге способствует свободному проникновению сюда арктических и тропических масс воздуха, что создает благоприятные условия для интенсивного развития атмосферных процессов.

Климат исследуемой территории отличается большой континентальностью. Возникновение циклонов и антициклонов, их перемещение и развитие зависят не только от распределения материков и океанов, но и от орографических условий.

Изучение особенностей циркуляции воздушных масс при возникновении сложных условий погоды проводилось по периодам года (переходному, холодному и теплему). К переходным периодам года отнесены весна и осень, холодному — зима, теплему — лето. Такие детальные исследования ранее не проводились. Началом весны можно считать конец апреля. К весенним месяцам относится и май. К летним месяцам относится июнь — август, к зимним — январь, февраль, март, ноябрь, декабрь. Осень наступает рано — в конце августа — начале сентября. По продолжительности она больше весны и холоднее. К осенним месяцам относится и октябрь. Условия погоды в сентябре и октябре сильно отличаются. Погода в сентябре неустойчива. Дневные температуры еще высокие, иногда они повышаются до плюс 29 °С. В то же время в сен-

тябре возможны сильные похолодания до $-7\ldots-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. В октябре морозные дни становятся обычным явлением. При похолодании температура может опуститься до $-35\ldots-43\text{ }^{\circ}\text{C}$. В третьей декаде октября завершается образование устойчивого снежного покрова и отмечается переход средней суточной температуры через $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, после чего устанавливается зимний режим.

Зима на исследуемой территории характеризуется длительными морозами, которые отмечаются в первых числах октября на севере (Саранпауль) и в первых числах ноября на юге (Леуши). Повсеместно устойчивые морозы регистрируются уже в третьей декаде октября. Продолжительность морозов колеблется от 170 дней на севере территории до 140 дней на юге. Наибольшее влияние на распределение температуры зимой оказывает общая пониженность рельефа. При всей своей незначительности и малых уклонах местности «котловинность» территории является фактором, резко искажающим общее, свойственное зиме, распределение температуры, которое определяется характером циркуляции атмосферы [1, 2].

Зима отличается относительной сухостью. В холодный период выпадает 20 % осадков. Как правило, в первую половину периода выпадает больше половины зимнего количества осадков. Дефицит осадков холодного периода образуется под влиянием активного антициклогенеза над Казахстаном и югом Западной Сибири. Избыток осадков определяют процессы, при которых через южные или центральные районы Западной Сибири часто проходят серии циклонов с Черного и Средиземного морей или с Атлантики. Наибольшее количество осадков выпадает на юге изучаемой территории.

Распределение ветра в центральной части Западной Сибири зависит от основных циркуляционных факторов. В течение холодного периода эти районы в основном находятся между ложбиной исландского минимума и отрогом сибирского антициклона. Зимой преобладают южные и юго-западные ветры, летом господствуют ветры северных и северо-западных направлений. Таким образом, зимой ветры направлены с охлажденного материка на океан, летом с океана на сушу, т. е. ясно выражена муссонообразность.

Скорость ветра зависит в большой степени от рельефа местности, а также от высоты и защищенности флюгера на метеоплощадке. Наиболее ветреным месяцем зимой на всей исследуемой территории является март. Сильные ветры со скоростью 15 м/с и более отмечаются чаще на севере и западе, несколько реже — на востоке. Скорость ветра 20 м/с наблюдается ежегодно, хотя бы один раз в сезон. Скорость ветра 25 м/с и сильнее отмечается еще реже. Неблагоприятное воздействие сильного ветра усугубляется другими опасными явлениями погоды — метелями и поземками.

Метели возникают при прохождении фронтов и увеличении барических градиентов. Общие метели сопровождаются снегопадами при прохождении циклонов и фронтальных разделов. Поземки в отличие от общих метелей чаще наблюдаются на периферии антициклонов или в передней части циклонов. Поземные метели обычны при более низких температурах, когда снег сухой. Меньше всего метелей фиксируется на станциях, расположенных на восточных склонах Уральских гор (Саранпауль, Няксимволь). Повторяемость числа дней с метелью увеличивается в долинах рек (Сургут). Направление ветра при метелях совпадает с преобладающим юго-западным или южным направлением. Но под влиянием орографии в отдельных пунктах оно может отклоняться.

Летом, как и в другие периоды года, температура воздуха является главным элементом погоды и климата. Основными факторами, обуславливающими температурный режим рассматриваемой территории, являются ее географическое положение, атмосферная циркуляция и рельеф местности. На состояние атмосферы оказывает влияние западная (атлантическая) циркуляция, но также сказывается и влияние континента, выраженное в большой повторяемости антициклональной погоды и интенсивной трансформации воздушной массы летом и зимой. Температурный режим летних месяцев в значительной степени определяется прогреванием и насыщением влагой воздушных масс, проникающих с севера. В результате чего формируется своеобразный местный континентальный воздух Западной Сибири. На большей части территории изотермы теплого периода года расположены в широтном направлении. При вторжении холодных арктических воздушных масс возможны очень резкие понижения температуры даже в июле (до минус 1 °C). Характерной чертой для рассматриваемого периода является преобладание циклонического типа погоды.

В связи с большим разнообразием природных ландшафтов в изучаемом районе велико и разнообразие в распределении атмосферных явлений.

Рядом исследований установлено, что наиболее опасными явлениями погоды в центральной части Западной Сибири в теплый период года являются сильные ливни, продолжительные дожди, интенсивные туманы, грозы, ветер, морось и др., прямо или косвенно связанные с перемещением циклонов по территории Сибири. Необходимо отметить, что в большинстве исследований изучались различные метеорологические и синоптические характеристики процессов, наблюдавшихся на территории Западной Сибири. По исследуемой центральной ее части подобные исследования не проводились.

Исследования, в которых в той или иной степени затрагивалась данная проблема, можно разделить на три группы. К первой группе относятся работы, в которых главное внимание уделено статистике циклонов и антициклонов [1—5]. Ко второй можно отнести исследования, которые посвящены разработке или усовершенствованию методов прогноза эволюции и путей перемещения барических образований, оказывающих влияние на погоду Сибири и Урала [6—10]. Третью группу составляют работы, посвященные синоптическим или синоптико-статистическим методам прогноза (долгосрочных или краткосрочных) конкретных явлений погоды (обильных осадков, метелей, гроз, ветра и т. д.) [11—15].

В настоящей работе по материалам наблюдений в летний сезон 2001—2003 гг. (июнь, июль, август) изучены условия появления опасных и неблагоприятных явлений погоды на территории Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО) (Югры), расположенного в центральной части Западной Сибири. Для более тщательного исследования особенностей погодообразующих факторов вся территория ХМАО по предложению ГУ «Ханты-Мансийский ЦГМС» была разделена на четыре района:

1. Северная часть округа — это северные районы территории. К ней отнесены метеостанции Саранпауль, Сосьва, Березово, Казым, Игрим, Юильск, Октябрьское и Няксимволь. Южная граница округа проходит по метеостанции Октябрьское.

2. Южная часть округа — это южные районы территории, к которой отнесены метеостанции Леуши, Куминская, Кондинское, Таурово, Шаим, Угут, Салым. Северная граница округа проходит через метеостанцию Угут.

3. Западная часть округа — это западные районы территории, к которой отнесены метеостанции Саранпауль, Сосьва, Березово, Игрим, Октябрьское, Ваньеган, Няксимволь, Шаим, Леуши, Куминская, Кондинское. Восточная граница округа проходит через метеостанцию Кондинское.

4. Восточная часть округа — это восточные районы территории. К ней относятся метеостанции Когалым, Радужный, Нижневартовск, Ваховск, Ларьяк, Корлики. Западная граница ее проходит через метеостанцию Когалым.

По данным наблюдений за 2001—2003 гг. видно, что летом по всей территории округа наблюдались ливневые дожди, дожди разной интенсивности (слабые, умеренные, сильные), ветер, грозы сухие и сопровождающиеся ливнями и градом, морось (слабая, умеренная и сильная), туманы и дымки. При этом в каждом районе округа больше всего явлений отмечено в июне, меньше — в июле.

При изучении структуры метеорологических полей проведена классификация атмосферных процессов, выявлены реально существующие над данным районом формы атмосферной циркуляции и специфика проявления их в физико-географических условиях исследуемой территории. Центральные районы Западной Сибири испытывают влияние как Атлантического и Северного Ледовитого океанов, так и европейского и азиатского континентов. Циклоны с севера Атлантического океана приходят сюда через районы арктических морей (Баренцева, Карского), переваливая северную часть уральского горного массива. Циклоны с Атлантики приносят с собой теплые и влажные воздушные массы. Серьезные изменения погоды приносят с собой циклоны, выходящие на Западную Сибирь с юга и юго-запада. Зарождаются они южнее 50° с. ш. в районах Каспийского, Черного и Аральского морей, юга европейской части России, Средней Азии и Казахстана. Антициклоны распространяются на центральную часть Западной Сибири в виде гребней и отрогов (с ядрами высокого давления) из районов Тувы, Монголии, Алтая, юга Восточной Сибири и районов восточного бассейна Арктики. Иногда на территорию Западной Сибири проникают антициклоны из районов европейской части России. Многие синоптические процессы над Западной Сибирью и, в частности, над центральными районами Западной Сибири определяет высотный блокирующий гребень над Уралом.

Все многообразие атмосферных процессов по определенным признакам разделено на шесть типов, имеющих по несколько подтипов (табл. 1). При выделении типа (подтипа) процесса учитывалось направление перемещения приземных центров циклонов и антициклонов, направление воздушного потока на высоте, направление барических и термических градиентов в тропосфере.

Первый тип. К этому типу отнесены процессы, при которых осуществляется западно-восточный перенос воздушных масс на значительной территории Евразии. Благоприятные условия для формирования этого типа создаются в том случае, когда над Арктическим бассейном располагается высокий циклон, прослеживающийся во всей толще тропосферы и занимающий значительную площадь. Циклонические изогипсы с большим радиусом кривизны заметно сгущены на южной периферии циклона, образуя планетарную высотную фронтальную зону (ПВФЗ). Ось ПВФЗ проходит по северным районам Евразии. На юге Европы и Западной Сибири располагается полоса повышенного давления, образуемая либо квазистационарными, либо быстро смещающимися антициклональными ядрами.

Повторяемость западных процессов над центральными районами Западной Сибири во все периоды года значительна. Весной она составляет 26,6, осенью — 29,0, зимой — 44,0, летом — 21,0 %. ПВФЗ, вдоль которой происходит смещение приземных циклонов, может распола-

Таблица 1

**Повторяемость различных типов циркуляции в ХМАО за лето
2001—2003 гг.**

ТП	Июнь		Июль		Август		Лето	
	N	%	N	%	N	%	N	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Район 1

11	8	1	32	4	44	6	84	4
12	81	11	96	13	136	18	313	14
13	42	6	44	6	16	2	102	5
1	131	18	172	23	196	26	499	23
21	24	3	0	0	68	9	92	4
22	52	7	8	1	16	2	76	3
23	134	19	88	12	76	10	298	13
24	36	5	0	0	8	1	44	2
2	246	34	96	13	168	23	510	23
31	44	6	94	13	4	1	142	6
32	8	1	24	3	24	3	56	3
33	96	13	161	22	188	25	445	20
34	0	0	76	10	4	1	80	4
3	148	21	355	48	220	30	723	33
41	0	0	0	0	0	0	0	0
42	28	4	2	0	0	0	30	1
43	67	9	0	0	0	0	67	3
44	36	5	0	0	0	0	36	2
4	131	18	2	0	0	0	133	6
51	0	0	20	3	0	0	20	1
52	0	0	18	2	104	14	122	6
53	4	1	81	11	44	6	118	5
5	4	1	119	16	148	20	271	12
61	36	5	0	0	0	0	36	2
62	24	3	0	0	12	2	36	2
63	0	0	0	0	0	0	0	0
6	60	8	0	0	12	2	72	3
Всего	720	100	744	100	744	100	2208	100

Район 2

11	8	1	32	4	44	6	84	4
----	---	---	----	---	----	---	----	---

12	81	11	96	13	136	18	313	14
13	42	6	40	5	16	2	102	5
1	131	18	168	23	196	26	495	22

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
21	24	3	0	0	68	9	92	4
22	52	7	8	1	16	2	76	3
23	134	19	88	12	76	10	298	13
24	36	5	0	0	8	1	44	2
2	246	34	96	13	168	23	510	23
31	44	6	94	13	4	1	142	6
32	8	1	24	3	0	0	32	1
33	96	13	161	22	188	25	445	20
34	0	0	76	10	4	1	80	4
3	148	21	355	48	196	26	699	32
41	0	0	0	0	0	0	0	0
42	28	4	6	1	0	0	34	2
43	67	9	0	0	0	0	67	3
44	36	5	0	0	0	0	36	2
4	131	18	6	1	0	0	137	6
51	0	0	20	3	0	0	20	1
52	0	0	18	2	128	17	146	7
53	4	1	81	11	44	6	118	5
5	4	1	119	16	172	23	295	13
61	36	5	0	0	0	0	36	2
62	24	3	0	0	12	2	36	2
63	0	0	0	0	0	0	0	0
6	60	8	0	0	12	2	72	4
Всего	720	100	744	100	744	100	2208	100

Район 3

11	8	1	32	4	40	5	80	4
12	81	11	56	8	136	18	273	12
13	42	6	44	6	16	2	102	5
1	131	18	132	18	192	26	455	21
21	24	3	0	0	68	9	92	4
22	52	7	8	1	16	2	76	3
23	134	19	88	12	76	10	298	13
24	36	5	0	0	8	1	44	2
2	246	34	96	13	168	23	510	23
31	44	6	94	13	4	1	142	6

Труды СибНИГМИ, выпуск 106

32	8	1	24	3	56	8	88	4
33	96	13	161	22	152	20	409	19
34	0	0	76	10	4	1	80	4
3	148	21	355	48	216	29	719	33
41	0	0	0	0	0	0	0	0
42	28	4	2	0	0	0	30	1

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
43	67	9	0	0	0	0	67	3
44	36	5	0	0	0	0	36	2
4	131	18	2	0	0	0	133	6
51	0	0	20	3	0	0	20	1
52	0	0	18	2	76	10	94	4
53	4	1	121	16	80	11	194	9
5	4	1	159	21	156	21	319	14
61	36	5	0	0	0	0	36	2
62	24	3	0	0	12	2	36	2
63	0	0	0	0	0	0	0	0
6	60	8	0	0	12	2	72	3
Всего	720	100	744	100	744	100	2208	100

Район 4

11	8	1	32	4	40	5	85	4
12	81	11	108	15	136	18	325	15
13	41	6	22	3	8	1	71	3
1	130	18	162	22	184	25	476	22
21	40	6	0	0	68	9	108	5
22	52	7	8	1	16	2	76	3
23	134	19	88	12	76	10	298	13
24	21	3	0	0	8	1	29	1
2	247	34	96	13	168	23	511	23
31	16	2	94	13	4	1	114	5
32	8	1	24	3	0	0	32	1
33	96	13	161	22	208	28	465	21
34	0	0	76	10	4	1	80	4
3	120	17	355	48	216	29	691	31
41	0	0	0	0	0	0	0	0
42	55	8	24	3	0	0	79	4
43	68	9	0	0	0	0	68	3
44	36	5	0	0	0	0	36	2
4	159	22	24	3	0	0	183	8
51	0	0	20	3	0	0	20	1
52	0	0	18	2	140	19	158	7
53	4	1	69	9	24	3	86	4
5	4	1	107	14	164	22	275	12
61	36	5	0	0	0	0	36	2

62	24	3	0	0	12	2	36	2
63	0	0	0	0	0	0	0	0
6	60	8	0	0	12	2	72	3
Всего	720	100	744	100	744	100	2208	100

Примечание. Здесь и в табл. 2—4: Т — тип синоптического процесса, П — подтип синоптического процесса, N — число случаев.

В зависимости от положения ПВФЗ группа западных процессов подразделяется на три подтипа [5, 9]. В первом подтипе траектории циклонов проходят через Скандинавию, север европейской территории России на северные районы Сибири. Во втором подтипе процессов ПВФЗ смещается южнее, и циклоны выходят на центральные районы Западной Сибири. При втором подтипе западных процессов циклоны перемещаются южнее 62° с. ш. (между 62 и 55° с. ш.) из центральных районов России через Средний и Южный Урал. Область пониженного давления с несколькими циклоническими центрами вытянута в широтном направлении от Великобритании через Центральную Европу, центр европейской территории России на центральные районы Западной Сибири (в полосе 55 — 60° с. ш.). При этих процессах осадки всех видов отмечаются местами в северных и южных районах. В западных и восточных районах территории летом изредка наблюдаются сильные ливни. В третьем подтипе циклоны перемещаются из центральных районов Европы через Средний и Южный Урал на Западную Сибирь. Преобладающими являются процессы первого подтипа. Весной и осенью их повторяемость одинакова и составляет 18 %. Остальные подтипы процессов наблюдаются в 10 % случаев и менее.

Второй тип. При данном типе процессов осуществляется вынос воздушных масс из южных районов европейской территории России и Средней Азии. Сформировавшиеся в этих районах циклоны (южные циклоны) по разным траекториям выходят на территорию Западной Сибири. Необходимым условием для выхода южных циклонов является наличие глубокой меридионально ориентированной ложбины. Ложбина формируется от высотного циклона над Арктикой и распространяется на Урал. Если ось ложбины направлена на Предуралье, то центры циклонов по восточной периферии ложбины перемещаются на северные районы Западной Сибири. Если ось ложбины проходит восточнее Урала, то циклоны движутся на восточные районы Западной Сибири. Повторяемость южных процессов в переходные периоды не более 20 % (6 % весной, 14 % осенью), зимой — 11 %, летом — 23 %. В зависимости от места возникновения и от траектории перемещения циклонов данный тип процессов делится на четыре подтипа. Южно-каспийские и аральские цикло-

ны (первый подтип) проходят по южным и восточным районам центральной части Западной Сибири. Циклоны с Северного Прикаспия (второй подтип) смещаются через центральные районы Западной Сибири. Циклоны из южных районов Европы перемещаются на территорию Западной Сибири, переваливая Урал в средней (третий подтип) или северной (четвертый подтип) частях. При четвертом подтипе центральные районы Западной Сибири оказываются в теплом секторе циклонов. В весенний период процессы четвертого подтипа не наблюдаются. Осенью их повторяемость велика и составляет 34 %. Первые три группы процессов имеют практически одинаковую повторяемость (20—30 %).

Третий тип. При процессах данного типа осуществляется вынос холодных масс воздуха из районов Арктики (северный процесс). Приземные циклоны перемещаются на центральные районы Западной Сибири из районов Карского и Баренцева морей через северные или полярные части Урала. Перемещения циклонов северного типа обуславливается положением высотного блокирующего гребня над Уралом и сопряженной с ним восточной ложбиной. При разрушении или ослаблении уральского блокирующего гребня происходит «ныряние» в район исследования циклонов с северных морей.

Характерной особенностью ПВФЗ при северном типе процессов является ее меридиональная направленность, способствующая вторжению арктического воздуха на центральные районы Западной Сибири. Повторяемость этого типа процессов для данной территории значительна и составляет 32 % весной, 20 % осенью, 29 % зимой, 33 % летом. В апреле северные процессы наблюдались в 50 % случаев.

В данном типе процессов выделено четыре подтипа, отличающиеся траекторией перемещения циклонов. Первый подтип характеризуется перемещением циклонов с северо-запада: из районов Норвежского и Баренцева морей, Коми АССР, Северного Урала, на Среднее Приобье. Второй подтип северного процесса отличается от предыдущего заключительной частью траекторий перемещения циклонов. При втором подтипе циклоны перемещаются с Баренцева моря через Полярный Урал на Среднее Приобье. Третий подтип характеризуется наличием над Уралом высотного блокирующего гребня. На южные районы Западной Сибири циклоны «ныряют» с Карского моря или п-ова Таймыр. Четвертый подтип северного процесса имеет наименьшую повторяемость. Он характеризуется выносом с Атлантики теплых и влажных воздушных масс, способствующих разрушению Сибирского антициклона. Антициклон над Северным Ледовитым океаном, наоборот, усиливается и смещается к югу. ПВФЗ опускается к югу. С севера осуществляется заток холода, вызывающий значительное похолодание в центральных районах Западной Сибири. Этот подтип имел наименьшую повторяемость. Не-

большую повторяемость имели также процессы, связанные с выносом тепла по западной периферии Уральского гребня далеко на север и образованием или усилением полярных антициклонов. Сибирский антициклон при таких процессах ослабевает, ПВФЗ опускается к югу, осуществляется заток холода, вызывающий сильное похолодание в центральных районах Западной Сибири.

Четвертый тип. При данном типе процессов погода над центральными районами Западной Сибири определяется влиянием Азиатского антициклона, который развивается над холодной сушей. Центры приземных антициклонов могут располагаться в районах Тувы — Монголии (первый подтип), по югу Сибири (второй подтип), на Алтае (третий подтип), в восточных районах Арктики (четвертый подтип). Гребни и отроги с ядрами от областей повышенного давления распространяются на Казахстан, Якутию и юг Красноярского края. Центральные районы Западной Сибири оказываются преимущественно на северных, северо-западных и северо-восточных перифериях этих образований. Повторяемость процессов четвертого типа невелика (весной — 8 %, осенью — 19 %, зимой — 9 %, летом — 6 %).

Пятый тип. Для данного типа процессов характерно влияние на погоду центральных районов Западной Сибири антициклональных образований. Но смещаются они сюда из районов Европы или Западной Арктики. Гребни и отроги с центрами распространяются от этих антициклонов на Казахстан и Западную Сибирь. Повторяемость этих процессов также невелика (весной — 17 %, осенью — 9 %, зимой — 4 %, летом — 14 %).

Шестой тип. Процессы этого типа характеризуются слабым переносом воздушных масс или отсутствием его. Это наблюдается в основном в барических седловинах и малоградиентных полях. Повторяемость их не превышает 3 % случаев.

Таким образом, исследование циркуляционных процессов над центральными районами Западной Сибири показало, что во все периоды года (весна, лето, осень, зима) над центральными районами Западной Сибири наблюдались преимущественно циклонические формы циркуляции (80—84 % случаев) и только в 16—30 % случаев антициклональные.

При северных процессах осадки весной чаще бывают в северной и южной частях исследуемой территории. Достаточно много их выпадает и в восточных районах. На западе территории летом в основном отмечаются ливни. При этом циклоны, приносящие осадки, наиболее часто перемещаются через Северный Урал с Баренцева или Карского морей.

Если высотный гребень над Уралом начинает разрушаться, то осадки, как правило, регистрируются в северных, южных и восточных районах, в западных они наблюдаются в 2—4 раза реже. При данном типе процессов осадки чаще бывают с холодными фронтами, реже — с теплыми, наиболее редко — с фронтами окклюзий и волнами. Скорости перемещения фронтов в основном от 10 до 40 км/ч, но наибольшая их повторяемость приходится на скорости 10—20 км/ч. Расстояние от фронта до района, в котором появляются осадки, оказывается 0—400 км, после прохождения фронта — от 100 до 400 км.

При южных процессах осадки в основном наблюдаются в северных и южных районах при выходе на территорию Сибири южно-каспийских, аральских или северокаспийских циклонов. Через Южный Урал на центральные районы Западной Сибири перемещаются циклоны с юга европейской части России и Черного моря. Следует отметить, что при переваливании циклонами Уральского хребта осадки начинают выпадать при приближении воздушной массы к центральной части Западной Сибири. При западных и северных процессах первыми начинают отмечать осадки метеостанции Березово, Няксимволь, Игрим, а потом и другие метеостанции. При приближении к ХМАО южных и юго-западных циклонов осадки начинаются на юго-западе территории — метеостанции Леуши, Уват, Дымковское, Демьянское и далее по всему региону. Среди опасных и неблагоприятных явлений погоды, создающих сложности в работе различных отраслей экономики, весной следует отметить грозы и туманы.

При анализе повторяемости опасных и неблагоприятных явлений погоды в разных частях исследуемой территории было замечено, что осень, как и весна, характеризуется выпадением осадков различного вида. В сентябре, как правило, отмечаются дожди и морось, в октябре — снег. Особенно большую повторяемость имеют ливневые и умеренные дожди в северных и восточных районах. В этих районах округа зафиксировано до 6—8 случаев выпадения очень сильных дождей. На западе и юге территории повторяемость осадков разной интенсивности в 1,5—2 раза меньше. Осенью по сравнению с весной увеличивается повторяемость туманов и уменьшается повторяемость гроз. Особенно много туманов в исследуемый ряд лет отмечалось на севере территории. Примерно одинаковая их повторяемость оказалась на западе, востоке и юге округа. Осадки и грозы осенью возникали при прохождении фронтальных разделов, связанных с западными, южными и северными процессами.

Таким образом, все опасные и неблагоприятные явления погоды в переходные сезоны года возникают наиболее часто при западных, северных и южных процессах при прохождении фронтов. Осадки чаще

всего выпадают на севере и востоке территории осенью, на севере и юге — весной. Гроз зафиксировано больше в восточных районах осенью, в южных — весной. Туманы наиболее часто возникают на севере территории осенью, на юге — весной.

В ряде исследований [3, 4, 7, 8, 12] отмечено, что в центральной части Западной Сибири в холодный период года чаще всего наблюдаются снегопады, метели, бураны, туманы и ветер. Эти явления погоды прямо или косвенно связаны с перемещением циклонов по территории Сибири. Метеорологические и синоптические характеристики процессов изучались по территории Сибири в целом. По отдельным районам подобные исследования не проводились. Работ, посвященных разработке или усовершенствованию методов прогноза эволюции и путей перемещения барических образований, оказывающих влияние на погоду Сибири и Урала, довольно мало [9—15]. В настоящей работе по материалам наблюдений за холодный период 2001—2003 гг. (январь, февраль, март, ноябрь, декабрь) изучены условия появления сложных условий погоды на территории ХМАО. Зимой в этом районе Западной Сибири чаще всего наблюдались снегопады разной интенсивности, сильные и умеренные поземки и низовые метели, туманы и дымки, редко — морось и гололед. Чаще всего опасные и неблагоприятные явления погоды отмечались на юге территории, несколько реже на западе, наиболее редко — на севере. Анализируя связь повторяемости разных явлений погоды с типами процессов в холодный период года, можно отметить, что наиболее часто они возникали при прохождении западных циклонов, в 1,5—2 раза реже — северных, в 3—4 раза реже — южных. При других типах процессов опасные явления погоды возникают редко.

Анализ условий появления опасных и неблагоприятных явлений погоды в центральных районах Западной Сибири показал, что чаще всего в холодный период года нарушают работу различных хозяйственных организаций снег различной интенсивности, ветер 15 м/с и более, туманы, сильные морозы (минус 40 °С и ниже). Все опасные и неблагоприятные явления погоды в холодный период возникали, как правило, во время развития западных, южных и северных процессов при прохождении фронтальных разделов.

К опасным и неблагоприятным явлениям погоды в центральном районе Западной Сибири в летний период отнесены сильные дожди, ливни, морось, ветер, грозы, туманы, дымки. Анализ характеристик барических полей по данным наблюдений за 2007—2009 гг. показал, что появление опасных, неблагоприятных и комплекса метеорологических

явлений (ОЯ, НЯ и КМЯ) в значительной степени зависит от особенностей циркуляции воздушных масс в средней тропосфере (на АТ_{700, 500, 400}). Замечено, что при появлении НЯ и ОЯ в средней тропосфере наблюдалась расходимость воздушных потоков над теми районами, где эти явления возникали. При возникновении КМЯ расходимость воздушных потоков в средней тропосфере не отмечалась. Решающую роль в подобных ситуациях играли направление и скорость потока в той части барического образования в средней тропосфере, с которым связано барическое образование у земли.

Проведено сравнение характеристик воздушной массы в нижней части тропосферы (земля, АТ₈₅₀). Сравнение характеристик воздушной массы позволило заметить, что при появлении НЯ, ОЯ и КМЯ в 2007—2009 гг. на территории ХМАО изменения температуры, влажности и давления воздушной массы у земли зависят как от траектории и скорости перемещения барических образований, так и от количества, типа и скорости перемещения фронтальных разделов.

Как видно из табл. 2, в 80 % случаев над Средним Приобьем в летний период наблюдались циклонические формы циркуляции и только в 20 % — антициклональные.

Наибольшую повторяемость (в среднем за лето 33 %) имели процессы, характеризующиеся выносом холодных воздушных масс из районов Арктики — северные процессы. При этом преобладающими оказались такие ситуации, когда над Уралом располагался блокирующий гребень. По его восточной периферии у земли на районы Среднего Приобья с Карского моря или п-ова Таймыр перемещались циклоны, принося холодные массы воздуха.

Несколько меньшую повторяемость имели южные (21—23 %) и западные (23 %) процессы.

Таблица 2

Повторяемость барических образований у земли при различных типах атмосферной циркуляции (лето 2001—2003 гг.)

ТП		Район 1						Район 2					
		Azn	Zn	Лжб	Грб	Мп	□	Azn	Zn	Лжб	Грб	Мп	□
1	N	25	94	175	106	98	498	30	99	186	81	98	494
	%	5	19	35	21	20	100	6	20	38	16	20	100
2	N	36	210	120	48	92	506	51	242	129	26	58	506
	%	7	42	24	9	18	100	10	48	26	5	11	100
3	N	42	170	168	156	187	723	41	187	172	137	162	699
	%	6	23	23	22	26	100	6	27	25	19	23	100
4	N	2	16	31	70	18	137	0	12	37	81	11	141

	%	1	12	23	51	13	100	0	9	26	57	8	100
5	N	7	5	96	113	50	271	11	7	81	125	71	295
	%	3	2	35	42	18	100	4	2	28	42	24	100
6	N	0	11	16	27	18	72	0	10	22	24	16	72
	%	0	15	22	38	25	100	0	14	31	33	22	100
□	N	112	506	606	520	463	2207	133	557	627	474	416	2207

Продолжение табл. 2

ТП		Район 3						Район 4					
		Azn	Zn	Лжб	Грб	Мп	□	Azn	Zn	Лжб	Грб	Мп	□
1	N	17	98	156	82	101	454	31	99	148	93	104	475
	%	4	22	34	18	22	100	6	21	31	20	22	100
2	N	42	213	117	52	82	506	70	251	101	33	56	571
	%	9	42	23	10	16	100	14	49	20	6	11	100
3	N	44	165	173	165	172	719	34	167	204	102	184	691
	%	6	23	24	23	24	100	5	24	29	15	27	100
4	N	2	24	45	45	21	137	1	32	33	89	28	183
	%	1	18	33	33	15	100	1	17	18	49	15	100
5	N	13	2	117	101	86	319	11	4	65	145	50	275
	%	4	1	36	32	27	100	4	1	24	53	18	100
6	N	0	10	23	21	18	72	3	20	12	22	15	72
	%	0	14	32	29	25	100	4	28	17	30	21	100
□	N	118	512	631	466	480	2207	150	573	563	484	437	2207

Примечание. N — число случаев, Azn — антициклоны, Zn — циклоны, Лжб — ложбины пониженного давления, Грб — гребни повышенного давления, Мп — малоградиентные поля.

При южных процессах в большинстве случаев осуществлялся вынос воздушных масс на Среднее Приобье из центральных и северо-западных районов Европейской России через Средний Урал. В некоторых ситуациях, при наличии ложбины от циклона над Арктикой, ориентированной на Европейскую территорию России, наблюдались выходы циклонов в центральные районы Сибири с юга. Южные циклоны в основном проходили по восточной части территории. При западно-восточном процессе в летний период Среднее Приобье преимущественно находилось под влиянием разных частей центрального циклона, располагавшегося над Обской губой. Небольшую повторяемость в исследуемые годы имели процессы, связанные с антициклональными полями Сибири и Европы. В среднем за лето они отмечались в 6—8 и 12—14 % случаев соответственно. За рассматриваемый период времени практически не

наблюдались процессы, характеризующиеся слабым переносом воздушных масс. В среднем за лето их было около 3 % случаев. При анализе повторяемости процессов общей циркуляции атмосферы по месяцам летнего периода обнаружилась некоторая закономерность. Так, повторяемость западно-восточных процессов мало изменялась в течение лета, оставаясь близкой к средним значениям. Южные процессы имели спад повторяемости в середине лета. В июле они отмечались в 13 % случаев, в июне и августе — в 34 и 23 % случаев соответственно. В то же время в июле значительно возросла повторяемость северных процессов (48 %).

С середины лета убывало число случаев, когда над Югрой погода определялась влиянием Сибирского антициклона. В июле и особенно в августе такие ситуации практически не наблюдались. В то же время увеличивалась от 1 % в июне до 23 % в августе повторяемость процессов, при которых отмечалось влияние антициклональных полей Восточной Европы.

Стоит отметить некоторые особенности циркуляции атмосферы в августе. Оказалось, что при отсутствии процессов четвертого и шестого типов появление процессов других типов равновероятно (повторяемость их в пределах 20—30 %).

Таким образом, повторяемость определенных форм атмосферных процессов в летний период над центральными районами Западной Сибири отражает сезонную перестройку общей циркуляции атмосферы, связанную со сменой холодного периода года на теплый. Так, возрастает повторяемость западных и северных форм циркуляции, что является показателем активизации циклонической деятельности над северными районами Западной Сибири. Антициклогенез над Западной Сибирью в летний период ослабевает в результате прогрева континента, в связи с чем влияние Сибирского антициклона исчезает.

В развитии антициклональных форм циркуляции большее влияние приобретает поле повышенного давления над европейской частью России и Западной Европы. Об этом свидетельствует повышение повторяемости пятого типа процессов.

Продолжительность различных типов циркуляции в основном (60—70 % случаев) составляет не более двух суток. В ряде случаев (до 20 % случаев) продолжительность возрастает (до 5 суток и более). Такие ситуации равновероятны для всех типов процессов. Процессы общей циркуляции атмосферы являются крупномасштабными и практически могут охватывать всю территорию, на которой проводилось исследование. Анализ повторяемости форм циркуляции по районам подтвердил этот факт. Различия в повторяемости процессов по районам оказались незначительными и составили по отдельным ситуациям не более 2 % в среднем за весь период. Следовательно, в дальнейшем циркуля-

ционные процессы можно рассматривать в целом для всего региона. Полученные данные о повторяемости процессов являются средними за 3 года. Следует отметить, что были годы, когда тот или иной процесс в каком-либо месяце не наблюдался.

В данной работе проанализированы для каждого типа циркуляции повторяемости приземных барических образований (антициклонов, циклонов, ложбин, гребней, малоградиентных полей) над территорией ХМАО по выделенным районам (см. табл. 2).

В целом за летний период при всех типах процессов центры антициклонов были отмечены в 5—7 % случаев. Центры циклонов, ложбины, гребни и малоградиентные поля наблюдались практически одинаковое число раз (20—27 % случаев).

Синоптические процессы у земли в летний период имели свои особенности при различных типах атмосферной циркуляции [7, 8].

При западном типе процессов, когда в атмосфере осуществлялся западно-восточный перенос воздушных масс, у земли над территорией Среднего Приобья преобладали барические ложбины (31—38 %). Повторяемость циклонов и малоградиентных полей по всем районам составила около 20 %, гребней чуть меньше (16—21 %). Антициклоны наблюдались редко (4—6 %). Следовательно, при западных процессах летом над ХМАО погодные условия чаще всего определяются наличием барической ложбины. Центры циклонов при этом, как правило, находятся в более северных районах.

Южные процессы характеризовались увеличением числа циклонов и ложбин над всеми районами региона. Повторяемость циклонов составила 42—49 %, ложбин — 20—24 %. По сравнению с западными процессами антициклоны наблюдались чаще, особенно в четвертом районе (14 %), а гребни отмечались реже (5—9 %). При южных процессах наблюдался выход в районы Среднего Приобья южных циклонов. Как известно [11, 14], необходимым условием их выхода является наличие в тропосфере глубокой, меридионально ориентированной ложбины в районе Уральского хребта. Смещение оси ложбины к востоку приводит к отклонению траекторий перемещения циклонов в восточном направлении. В связи с этим, вероятно, отмечалось некоторое увеличение повторяемости числа циклонов во втором и четвертом районах территории. Южные циклоны обычно перемещаются с большой скоростью, быстро углубляются, способствуют резкому изменению погоды и возникновению опасных явлений.

Наибольшую повторяемость летом над рассматриваемой территорией имели северные процессы. В период их существования появление

различных барических образований у земли практически равновероятно (повторяемости по всем районам 19—29 %), за исключением антициклонов. Их повторяемость составила 6 %.

В различных исследованиях по региональной синоптике установлено, что характерной особенностью северного типа процессов является меридиональная направленность потоков, способствующая глубокому межширотному воздухообмену. Смещение циклонов обусловлено положением высотного гребня над Уралом и сопряженной с ним восточной ложбиной [3, 4, 15]. Процессу выхода циклонов благоприятствует разветвление струйного течения на поверхности 300 гПа, направленного параллельно ведущему потоку в нижней тропосфере [15].

Как указывалось выше, повторяемость процессов, связанных с деятельностью антициклонов, летом в ХМАО невелика. Но некоторые особенности приземной циркуляции в этот период проявились. В основном это выразилось в увеличении повторяемости гребней высокого давления (40—50 %).

Таким образом, анализ циркуляционных процессов над территорией ХМАО в теплый период года позволил сделать следующие выводы:

- Характер атмосферных процессов над территорией ХМАО в теплый период отражает сезонную перестройку общей циркуляции в тропосфере.
- Наибольшую повторяемость в этот период имели северные процессы (33 % случаев). Западные и южные процессы наблюдались в 23 % случаев. Процессы, связанные с деятельностью антициклонов, имели небольшую повторяемость (от 3 до 14 % случаев).
- Различия в повторяемости процессов по районам оказались незначительными (не более 2 % случаев).
- У земли летом в 50 % случаев наблюдались циклонические образования (центры циклонов, ложбины). Повторяемость антициклонов мала (7 % случаев).

На основе анализа атмосферной циркуляции, характеристик барических образований у земли и погодных условий предпринята попытка сформулировать методические рекомендации для прогноза с заблаговременностью 24 ч опасных и неблагоприятных явлений погоды при разных типах процессов в теплый период года:

— если при западных процессах на территории Западной Сибири циклоны, перевалив Северный Урал, медленно (со скоростью 45 км/ч и менее) перемещались по широте 61—64° с. ш. с запада на восток, то осадки и усиление ветра следует ожидать по всей территории ХМАО; прохождение фронтальных разделов увеличивает вероятность выпадения осадков и усиления ветра;

— если при западных процессах в районе Новой Земли находится малоподвижный циклон, а по северному побережью европейской части России и Сибири, «окклюдируясь», быстро (со скоростью 40—60 км/ч) с запада на восток перемещаются фронтальные разделы, то опасные и неблагоприятные явления погоды следует ожидать по всей территории округа;

— если при южном процессе ось ложбины арктического циклона в тропосфере проходит западнее Уральского хребта, а приземные циклоны из южных районов европейской части России и Средней Азии приносят горячий сухой воздух, то на всей территории центральной части Западной Сибири, находящейся в теплом секторе циклона, отмечается жара (температура воздуха у земли может повышаться до плюс 30 °С и более);

— если ось высотной ложбины проходит по Уралу, а южные циклоны, углубляясь, перемещаются со скоростью 45 км/ч и менее на север и северо-восток по центральным районам Западной Сибири, то дожди, грозы и сильный ветер следует ожидать по юго-западным и западным районам с распространением на всю исследуемую территорию;

— если при южном процессе ось ложбины арктического циклона в тропосфере проходит восточнее Уральского хребта, а северные и западные районы территории оказались под северными потоками, совпадающими по направлению с движением воздушных масс у земли, то в этих районах возможны заморозки;

— если высотный гребень над Уралом разрушается, а северные циклоны смещаются из районов Баренцева и Карского морей на юг Западной Сибири через центральные районы, то дожди, грозы и ветер следует ожидать практически по всей территории ХМАО;

— если при северных потоках в июне и августе ожидается прохождение холодных фронтов, то с учетом локальных особенностей рельефа (мелких котловин, долин рек и т. д.) на востоке территории возможно понижение температуры до заморозков;

— если летом наблюдается влияние сибирского антициклона, то температура воздуха у земли может повышаться в разных районах центральной части Западной Сибири до плюс 30 °С и более.

Методические рекомендации были испытаны в Ханты-Мансийском ЦГМС, где были проведены расчеты, оценка и анализ прогнозов опасных и неблагоприятных явлений погоды по территории ХМАО в теплый период 2007—2009 гг. Общая оправдываемость прогнозов НЯ, ОЯ и КМЯ по территории составила 91,2 %. Анализ оправдываемости прогнозов показал, что для более надежных выводов о вероятности и времени возникновения НЯ, ОЯ и КМЯ нужны более детальные исследова-

ния условий и времени появления этих явлений при разных типах процессов на гораздо большем количестве случаев.

Литература

1. Орлова В.В. Климат СССР. Вып. 4. Западная Сибирь. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 3609 с.
2. Справочник по климату СССР. Вып. 17, ч. II, III, IV, V. Л.: Гидрометеиздат, 1965—1967.
3. Бордовская Л.И. Блокирующий гребень над Уральским хребтом и их влияние на синоптические процессы Западной Сибири // Труды ЗСРНИГМИ. 1976. Вып. 21. С. 90—98.
4. Бордовская Л.И. Некоторые сведения о ныряющих циклонах над Западной Сибирью // Труды НРГМЦ. 1960. Вып. 3. С. 121—128.
5. Кошинский С.Д. Синоптико-статистическая характеристика циклонической деятельности над Западной Сибирью в холодное время года // Труды ЗСРНИГМИ. 1976. Вып. 21. С. 106—113.
6. Горбатенко В.П., Ипполитов И.И., Поднебесных Н.В. Циркуляция атмосферы над Западной Сибирью в 1976—2004 гг. // Метеорология и гидрология. 2007. № 5. С. 28—36.
7. Кудрявцева Л.А. Некоторые синоптические условия в возникновении осадков над центральными районами Урала и Западной Сибири // Труды ГГО. 1976. Вып. 316. С. 122—135.
8. Опасные явления погоды на территории Сибири и Урала. Ч. IV. Л.: Гидрометеиздат, 1987.
9. Попова К.И. К вопросу о циркуляции атмосферы над Западной Сибирью в летний период // Труды ГГО. 1964. Вып. 164. С. 64—73.
10. Поспелова В.Ф. Об эволюции южных циклонов // Ученые записки Пермского госуниверситета. 1967. № 168 (Гидрология и метеорология), вып. 2. С. 133—140.
11. Прокопьева И.П. Прогноз эволюции и перемещения южных циклонов // Труды ЗСРНИГМИ. 1975. Вып. 15. С. 54—59.
12. Прокопьева И.П. Связь значительных снегопадов на юго-востоке Западной Сибири с интенсивностью циклонов и траекториями их перемещения // Труды ЗСРНИГМИ. 1978. Вып. 36. С. 50—56.
13. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. II, вып. 2. Урал и Сибирь. Л.: Гидрометеиздат, 1986. С. 4—24.
14. Ситникова Т.С. Условия выхода южных циклонов на районы Западной Сибири // Труды НРГМЦ. 1967. Вып. 1(5). С. 84—88.
15. Чернова В.Ф. Ныряющие циклоны и струйные течения // Труды ГМЦ СССР. 1968. Вып. 22. С. 70—76.

**О ЗАВИСИМОСТИ МАКСИМУМОВ ЧИСЕЛ ВОЛЬФА
ОТ КРИВИЗНЫ И КРУЧЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ
ДВИЖЕНИЯ СОЛНЦА ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА
ИНЕРЦИИ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ**

Н.Н. Завалишин

*ГУ «Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт», г. Новосибирск*

Введение

Солнце, как самый массивный объект Солнечной системы, удерживает силой гравитации планеты на их орбитах. Но и планеты, то собираясь в узком секторе, то рассредоточиваясь по пространству, заставляют Солнце совершать орбитальное движение относительно центра инерции Солнечной системы (ЦИСС). Такое вынужденное движение Солнца под воздействием внешних сил вызывает различные аномалии в солнечной активности. Теодор Ландшайт в работах [1, 2] и других наиболее полно и последовательно проанализировал эту связь. Он показал, что орбитальный угловой момент Солнца и его производные влияют на числа Вольфа и другие солнечные явления. Прогнозы Т. Ландшайта солнечной активности и ее земного эха неоднократно проверялись и показали удивительно высокую оправдываемость. В одной из своих последних работ [2] автор указывает, что попятное (retrograde) движение Солнца с 178,8-летним периодом является точками синхронизации чисел Вольфа, и на этой основе дает прогноз максимума очередного цикла в 2011,8 году с величиной максимума около $W = 100$ и последующих четырех—пяти слабых циклов с максимумами $W < 80$. В его работах по этой проблеме, как и в работах [3—5] и других, анализ орбитального движения Солнца проводится в неподвижной относительно звезд системе координат.

В [6] был сделан переход в подвижную систему координат с началом в центре масс Солнца и осями, определяемыми репером Френе (сопровождающим триэдром). Были найдены кручение и кривизна траектории движения центра масс Солнца относительно ЦИСС с шагом по времени в один год. Оказалось, что, как правило, максимум чисел

Вольфа находится рядом с экстремумами или точками перегиба (перелома) в интеграле от кручения траектории движения Солнца.

Рассмотрим совместное воздействие кручения и кривизны на солнечную активность, измеряемую числами Вольфа.

Движение Солнца в неподвижной системе координат

Центр инерции (центр масс) системы из n материальных точек с массами m_k ($k = 1, n$) и координатами, заданными в момент времени t векторами $\mathbf{R}_k(t)$, определяется как точка, при помещении в которую начала координат выполняется равенство

$$\sum_1^n \mathbf{R}_k(t) m_k = 0. \quad (1)$$

Известно, что такая точка существует, и она единственная в каждый момент времени.

Применим теперь (1) к Солнечной системе:

$$\sum_0^9 \mathbf{R}_k(t) m_k = 0, \quad (2)$$

где индекс «0» относится к Солнцу, а остальные — порядковые номера планет, включая Плутон. Под массой понимается масса планеты с ее спутниками. Возникают две проблемы. Во-первых, Солнце, в отличие от планет, не может считаться материальной точкой, так как линейный размер и радиус кривизны траектории Солнца — величины одного порядка. И во-вторых, Солнце не твердое и не однородное тело, а значит, его центр масс может перемещаться относительно своего геометрического центра.

Первую проблему можно формально обойти, если мысленно разделить Солнце, скажем, на миллиард одинаковых по массе компактных частей и вставить их в уравнение (1). Линейные размеры этих частей будут на 3 порядка меньше диаметра Солнца и кривизны его траектории, т. е. модель материальной точки будет к ним применима. Тогда уравнение (2) примет вид

$$10^{-9} m_0 \sum_1^{10^{**9}} \mathbf{r}_j(t) + \sum_1^9 \mathbf{R}_k(t) m_k = 0, \quad (3)$$

где $\mathbf{r}_j$ — вектор от центра инерции до выделенной частицы Солнца. У Солнца, разделенного на множество небольших частей, также есть свой центр масс. Представляя

$$\mathbf{r}_j = \mathbf{R}_0 + \mathbf{s}_j,$$

где $\mathbf{R}_0$ — вектор от центра инерции Солнечной системы до центра масс Солнца; $\mathbf{s}_j$ — векторы из центра масс Солнца до его частей, вставляя $\mathbf{r}_j$ в (3) и учитывая, что сумма $\mathbf{s}_j$ равна нулю, получим уравнение (2).

Вторая проблема сложнее: геометрический центр Солнца как шара может не совпадать с центром его масс за счет смещения внешних оболочек относительно солнечного ядра. И если по Кеплеру фокус орбиты Земли находится в центре Солнца, то о каком центре идет речь: о геометрическом или о центре масс? Надо помнить об этой проблеме при интерпретации результатов.

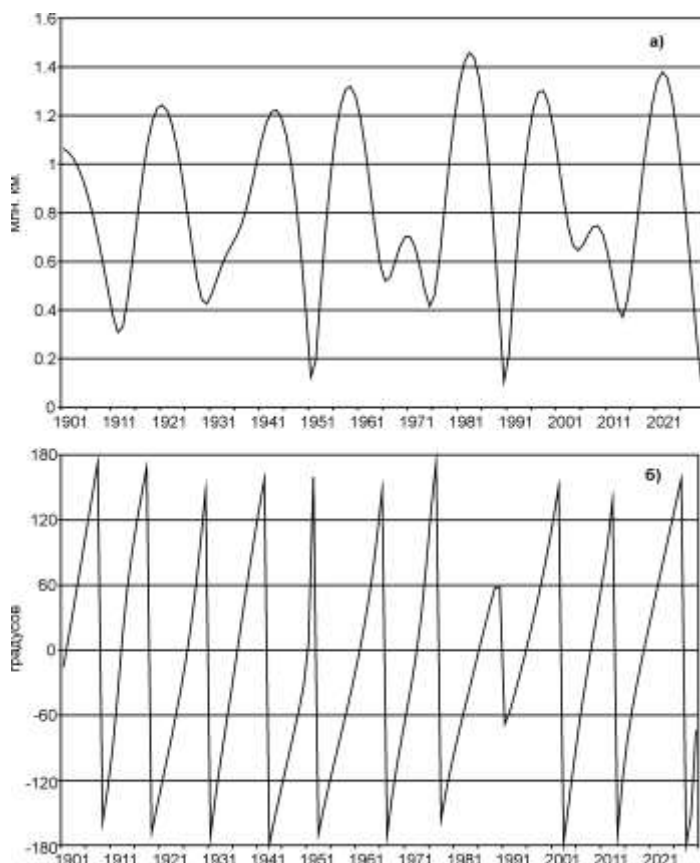


Рис. 1. Вектор смещения центра масс Солнца от центра инерции Солнечной системы в неподвижной системе координат:

а — модуль вектора; б — угол между вектором и направлением на перигелий Земли
Перепишем теперь уравнение (2) в виде

$$\mathbf{R}_0(t) = - \sum_1^9 \mathbf{R}_k(t) m_k / m_0. \quad (4)$$

Зная координаты планет и их массы со спутниками относительно массы Солнца, из уравнения (4) найдем вектор смещения центра масс Солнца относительно ЦИСС, который для краткости иногда будем называть «смещением Солнца».

На рис. 1 приводится график модуля вектора $\mathbf{R}_0(t)$ и угла между ним и перигеем орбиты Земли. Угол необычно изменялся в 1985—1996 гг.: вектор смещения, пройдя перигелий, «попятился» назад и снова прошел вперед через перигелий. Это довольно редкое событие, с указанным ранее периодом в 178,8 лет и с ним, в частности, связывают некоторые аномальные явления в лито-, гидро- и атмосфере Земли.

Первопричиной нынешнего попятного движения Солнца явилось, как всегда, схождение тяжелых планет в узком секторе в 1982—1983 гг. По нашему мнению, именно наложение попятного движения Солнца на перигелий орбиты Земли с достижением в этот период экстремальных значений модулем вектора смещения и явилось непосредственной причиной современного потепления [7].

Алгоритм вычисления кривизны и кручения по пяти точкам

Пусть в 3-мерном пространстве задана траектория движения точки

$$\mathbf{R}(u) = (x(u), y(u), z(u)),$$

где u — параметр. Обозначим через $\mathbf{t}$, $\mathbf{n}$, $\mathbf{b}$ единичные векторы (касательной, нормали, бинормали) сопровождающего триэдра кривой $\mathbf{R}(u)$. По определению, вектор Дарбу есть

$$\boldsymbol{\Omega} = \rho \mathbf{b} + \tau \mathbf{t} \quad (5)$$

где ρ , τ — кривизна и кручение кривой $R(u)$, равные

$$\rho = \frac{|R^{[1]} \times R^{[2]}|}{|R^{[1]}|^3}, \quad \tau = \frac{|R^{[1]} R^{[2]} R^{[3]}|}{|R^{[1]} \times R^{[2]}|^2}. \quad (6)$$

Цифры в квадратных скобках обозначают номер производной по параметру u . Будем также считать, что для всех точек кривой $\mathbf{R}(u)$ выполняются условия

$$(\mathbf{R}^{[1]} \times \mathbf{R}^{[2]}) \neq 0. \quad (7)$$

И пусть известны значения вектора $\mathbf{R}$ в n точках $u_1, u_2, \dots, u_n$:

$$\mathbf{R}(u_k) \quad (k = 1, \dots, n), \quad (8)$$

$$u_1 < u_2 < \dots < u_n. \quad (9)$$

Займемся теперь нахождением кривизны и кручения кривой $\mathbf{R}(u)$ в точках $u = u_k$ на основе (6—9). Для достаточно гладких функций можно разложить вектор $\mathbf{R}(u)$ в ряд Тейлора в окрестности некоторой точки u_k с точностью до членов порядка $(u - u_k)^5$:

$$\mathbf{R}(u) \approx \mathbf{R}(u_k) + \sum_{h=1}^{h=4} \mathbf{R}^{[h]}(u - u_k)^h / h! \quad (10)$$

В уравнении (10) неизвестны 4 производных от вектора $\mathbf{R}$ в точке u_k . Для их оценки возьмем пять точек: $u_{k-2}, u_{k-1}, u_k, u_{k+1}, u_{k+2}$ и составим систему из четырех уравнений:

$$\mathbf{R}(u_{k+j}) - \mathbf{R}(u_k) = \sum_{h=1}^{h=4} \mathbf{R}^{[h]}(u_{k+j} - u_k)^h / h! \quad (j = -2, -1, 1, 2). \quad (11)$$

Для удобства введем обозначения $b_j = u_{k+j} - u_k$ и выпишем систему (11) в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{R}(u_{k-2}) - \mathbf{R}(u_k) \\ \mathbf{R}(u_{k-1}) - \mathbf{R}(u_k) \\ \mathbf{R}(u_{k+1}) - \mathbf{R}(u_k) \\ \mathbf{R}(u_{k+2}) - \mathbf{R}(u_k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{-2} & b_{-2}^2 / 2! & b_{-2}^3 / 3! & b_{-2}^4 / 4! \\ b_{-1} & b_{-1}^2 / 2! & b_{-1}^3 / 3! & b_{-1}^4 / 4! \\ b_1 & b_1^2 / 2! & b_1^3 / 3! & b_1^4 / 4! \\ b_2 & b_2^2 / 2! & b_2^3 / 3! & b_2^4 / 4! \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{R}^{[1]}(u_k) \\ \mathbf{R}^{[2]}(u_k) \\ \mathbf{R}^{[3]}(u_k) \\ \mathbf{R}^{[4]}(u_k) \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Обозначим через $\mathbf{A}$ матрицу системы (12). Тогда детерминант системы сводится к определителю Вандермонда:

$$D_k = \det(\mathbf{A}) = \frac{b_{-2} b_{-1} b_1 b_2}{2!3!4!} (b_{-1} - b_{-2})(b_1 - b_{-2})(b_2 - b_{-2})(b_1 - b_{-1})(b_2 - b_{-1})(b_2 - b_1). \quad (13)$$

Из условия (9) и определения b_j следует, что $b_{-2} < b_{-1} < 0 < b_1 < b_2$, и поэтому детерминант (13) $D_k \neq 0$ для всех $k = 3, \dots, n - 2$, и, следовательно, существует единственное решение системы (12), которое имеет следующий вид:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{R}^{[1]}(u_k) \\ \mathbf{R}^{[2]}(u_k) \\ \mathbf{R}^{[3]}(u_k) \\ \mathbf{R}^{[4]}(u_k) \end{pmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{R}(u_{k-2}) - \mathbf{R}(u_k) \\ \mathbf{R}(u_{k-1}) - \mathbf{R}(u_k) \\ \mathbf{R}(u_{k+1}) - \mathbf{R}(u_k) \\ \mathbf{R}(u_{k+2}) - \mathbf{R}(u_k) \end{pmatrix}. \quad (14)$$

В частном случае, когда $u_k = k \Delta$, $b_j = j \Delta$, ($\Delta = \text{const}$),

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -2\Delta & 2\Delta^2 & -4\Delta^3/3 & 2\Delta^4/3 \\ -\Delta & \Delta^2/2 & -\Delta^3/6 & \Delta^4/24 \\ \Delta & \Delta^2/2 & \Delta^3/6 & \Delta^4/24 \\ 2\Delta & 2\Delta^2 & 4\Delta^3/3 & 2\Delta^4/3 \end{pmatrix},$$

$$\Delta^7 \mathbf{A}^{-1} = \begin{pmatrix} \Delta^6/12 & -2\Delta^6/3 & 2\Delta^6/3 & -\Delta^6/12 \\ -\Delta^5/12 & 4\Delta^5/3 & 4\Delta^5/3 & -\Delta^5/12 \\ -\Delta^4/2 & \Delta^4 & -\Delta^4 & \Delta^4/2 \\ \Delta^3 & -4\Delta^3 & -4\Delta^3 & \Delta^3 \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Формула (14) с матрицей (15) дает оценку первых четырех производных вектора $\mathbf{R}$ в точке u_k для равноотстоящих значений параметра u по значениям вектора в пяти точках: $\mathbf{R}(u_{k-2})$, $\mathbf{R}(u_{k-1})$, $\mathbf{R}(u_k)$, $\mathbf{R}(u_{k+1})$, $\mathbf{R}(u_{k+2})$.

Зная первые три производные, находим кривизну и кручение траектории по формуле (6).

Движение Солнца в подвижной системе координат

Зная координаты планет в различные моменты времени $u_1, \dots, u_n$ по формуле (4), получим оценку координат траектории движения Солнца $\mathbf{R}_0(u_k)$. По (6) вычислим кривизну и кручение траектории, учитывая, что условия применения этой формулы (7) и (9) выполняются. Заметим, что возможен и обратный переход: зная кривизну, кручение и значение $\mathbf{R}_0$ в одной точке, можно однозначно восстановить $\mathbf{R}_0(u)$. Иными словами, переход в движущуюся систему координат не приводит к потере никакой информации о движении Солнца.

При оценке параметров вектора Дарбу важно выбрать шаг по времени или по длине отрезка траектории. При маленьком шаге, например в одни сутки, потребуется очень большая точность в вычислении координат планет, чтобы уловить кривизну траектории Солнца на интервале в 5 суток. Если же взять слишком большой шаг, например в 3 года, то за 15 лет Солнце уйдет на второй оборот, и корректную оценку параметров не получить. Оптимальным представляется шаг от полугода до одного года.

На рис. 2 представлены графики изменения кривизны и кручения траектории Солнца с шагом в 1 год за период 1701—2050 гг. Параметр кривизны ведет себя как почти периодическая функция с основным периодом около 20 лет, который, очевидно, определяется периодом схождения Юпитера с Сатурном в 19,86 года. В цитированных и других работах исследовали связь радиуса кривизны – параметр, обратный к кривизне, — с солнечной активностью. Кручение — это более сложная функция: видны два типа экстремумов, модуль кручения которых больше или меньше 2 (млн км)^{-1} . Параметры вектора Дарбу характеризуют разные силы, воздействующие на Солнце: кривизна отражает центробежные силы, а кручение характеризует гироскопические силы, которые выводят вращающееся вокруг своей оси тело из плоскости его орбитального вращения.

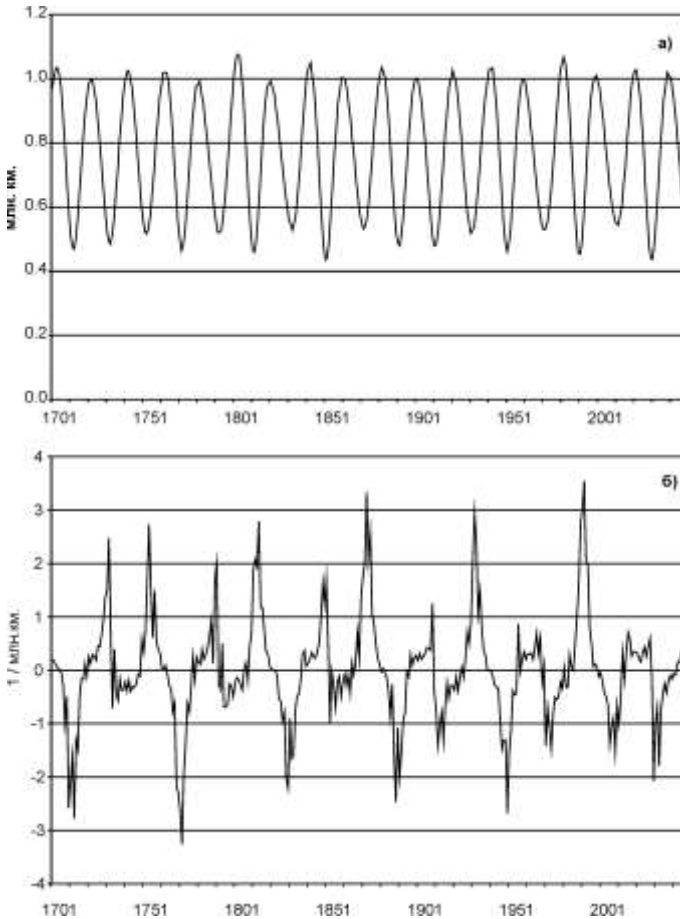


Рис. 2. Параметры движения центра масс Солнца в подвижной системе координат:
а — радиус кривизны траектории; б — кручение траектории

Анализ зависимости солнечной активности от параметров вектора Дарбу

Рассмотрим теперь связь максимумов чисел Вольфа с кривизной и кручением. Среднегодовые числа Вольфа взяты из ftp.ngdc.noa.gov/STP/SOLAR_DATA/SUNSPOT_NUMBERS/YEARLY

На рис. 3 представлены суммы аномалий кривизны и кручения с нанесенными на них максимумами чисел Вольфа. За «норму» кривизны

взято среднее значение за период 1701—2050 гг., равное $1,39 \text{ (млн км)}^{-1}$, а за «норму» кручения, естественно, взят ноль.

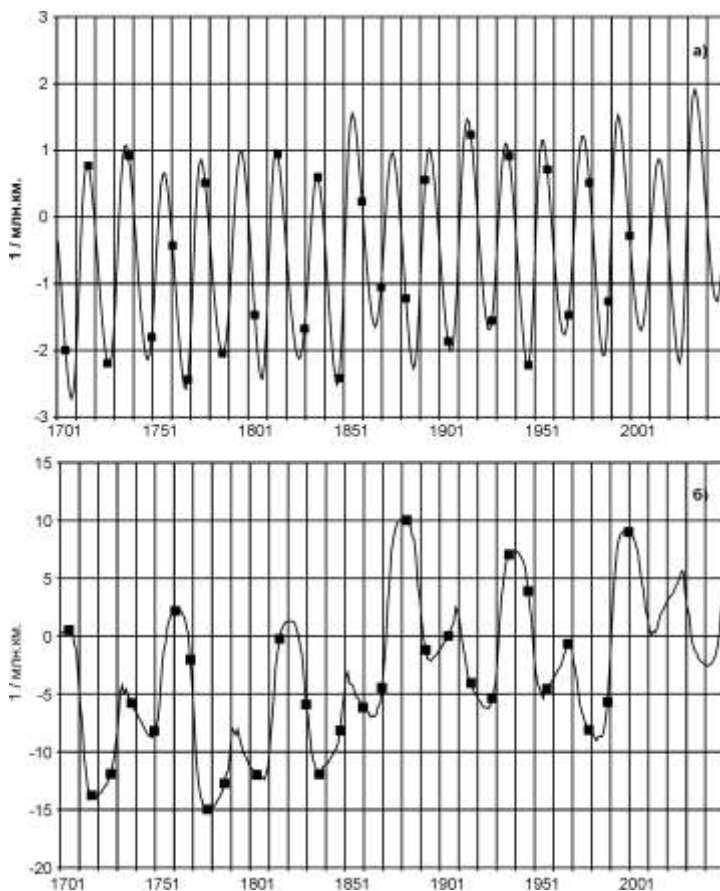


Рис. 3. Суммы аномалий кривизны (а) и кручения (б) траектории Солнца с годами максимумов чисел Вольфа (квадратики)

Если рассматривать только кручение, то год максимумов чисел Вольфа близки к годам достижения экстремумов кручения, когда суммы аномалий имеют значительный прирост или спад. К этой группе можно отнести следующие года максимумов: 1705, 1717, 1761, 1778, 1837, 1883, 1893, 1937, 1957, 1968, 1979, 2000 и сюда же можно присоединить пару лет с небольшими экстремумами кручения: 1750, 1804. Исключение составляет максимум 1830 г., который начался на несколько лет

раньше достижения кривизной локального максимума, весьма значительного по величине.

Зависимость годов максимума чисел Вольфа от экстремумов сумм аномалий кривизны и кручения траектории движения Солнца

Номер цикла	Год максимума	Среднегодовое число Вольфа	Экстремумы	
			кривизны	кручения
–4	1705	59		макс.
–3	1717	63	макс.	мин.
–2	1727	122	мин.	
–1	1738	111	макс.	
0	1750	83		мин.
1	1761	86		макс.
2	1769	106	мин.	
3	1778	154		мин.
4	1787	132	мин.	
5	1804	48		мин.
6	1816	46	макс.	
7	1830	71	?	?
8	1837	138	макс.	мин.
9	1848	125	мин.	
10	1860	96	?	?
11	1870	139	?	?
12	1883	64		макс.
13	1893	85		мин.
14	1905	64	мин.	
15	1917	104	макс.	
16	1928	78	мин.	
17	1937	114	макс.	макс.
18	1947	152	мин.	
19	1957	190		мин.
20	1968	106		макс.
21	1979	155		мин.

Суммы аномалий кривизны также часто располагают свои экстремумы рядом с годами максимумов чисел Вольфа, как бы выходя на первый план, когда суммы аномалий кручения значительно меньше среднего значения. К этой группе относятся 1717, 1927, 1738, 1769, 1787, 1816, 1837, 1848, 1905, 1917, 1928, 1937, 1947 года. Отметим совпадение экстремумов кривизны и кручения в трех случаях: в 1717, 1837 и 1937 г.

Четыре максимума — 1830, 1860, 1870, 1989 гг. — расположены на значительном удалении от локальных экстремумов кручения и кри-

визны, хотя первый из них попадает на точку перегиба, а второй — на точку перелома интеграла от кручения траектории Солнца.

Результаты проведенного анализа сведены в таблицу. В таблице указан тип экстремума (максимум или минимум), а вопросами отмечены года, не укладывающиеся в общую схему.

Построение физико-статистической модели, объясняющей совместное влияние двух разных по своей физической сущности компонент вектора Дарбу на солнечную активность, — это проблема будущих исследований.

Выводы

1. Представлен алгоритм нахождения параметров вектора Дарбу по 5-точечной схеме для равного шага по времени.

2. Для интервала 1701—2050 гг. найдены кривизна и кручение траектории движения Солнца относительно центра инерции Солнечной системы.

3. Максимумы чисел Вольфа располагаются вблизи значительных по абсолютной величине локальных сумм аномалий кручения. В целом экстремумы кручения располагаются рядом с 14 максимумами чисел Вольфа, а из оставшихся 14 рядом с экстремумами сумм аномалий кривизны располагаются 10 максимумов чисел Вольфа.

Литература

1. *Landscheidt T.* Solar Rotation, Impulses of the Torque in the Sun's Motion, and Climatic Variation // *Climatic Change*. 1988. N 12. P. 265—295.
2. *Landscheidt T.* Extrema in sunspot cycle linked to sun's motion // *Solar Physics*. 1999. Vol. 189. P. 413—424.
3. *Jose P.D.* Sun's motion and sunspots // *The Astronomicval Journal*. 1965. Vol. 70, N 3. P. 193.
4. *Войчишин К.С., Драган Я.П., Куксенко В.И., Михайловский В.Н.* Информационные связи био-, гелио-, геофизических явлений и элементы их прогноза. Киев: Наукова думка, 1974.
5. *Морозова А.Л., Пудовкин М.И., Черных Ю.В.* // *Геомагнетизм и аэрономия*. 1999. Т. 39, № 2. С. 40—44.
6. *Zavalishin N.N.* Effect of the Sun shift from the center of inertia on the temperature of the troposphere // *Atmospheric and Ocean Optics*. 2009. Vol. 22, N 1. P. 118—120.
7. *Завалишин Н.Н.* О геофизических эффектах дисимметрии Солнечной системы // *Солнечно-земная физика*. 2005. Вып. 8. С. 185—186.

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ КЛИМАТА НОВОСИБИРСКА

В.Н. Барахтин, И.О. Лучицкая, Н.И. Белая

*ГУ «Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт», г. Новосибирск*

Метеорологические наблюдения

Первую метеостанцию «Новониколаевск» организовали на левом берегу Оби в Кривошекове — поселке строителей железнодорожного моста через р. Обь в 1891 г. Начались регулярные метеонаблюдения, необходимые для инженерных расчетов при строительстве моста. В 1897 г. метеорологическая станция была перенесена на правый берег Оби к железнодорожному мосту и стала называться «Правая Обь». Она состояла при конторе начальника 9-го участка железной дороги и в 1925 г. получила название «Новосибирск», соответствуя новому наименованию города. Но городская территория расширялась, станция окружалась со всех сторон строениями, поэтому неоднократно меняла местоположение. Только в 1956 г. метеорологическую станцию перенесли на юго-восточную окраину поселка Огурцово, где она находится в настоящее время.

В 1931 г. создан Гидрометеокомитет при Новосибирском крайисполкоме, появились новые формы метеорологического обслуживания различных хозяйственных структур и населения: организованы службы урожая, железных дорог, водного транспорта и авиации. 12 мая 1933 г. в городском аэропорту была открыта авиаметеорологическая станция (АМСГ) [1]. В 1944 г. при авиазаводе им. В.П. Чкалова создана оперативная метеогруппа для обеспечения испытательных полетов.

Датой организации АМСГ в Толмачево считается 7 мая 1957 г., когда первые самолеты Ту-104 появились в небе Новосибирска.

В 1964 г. в аэропорту Толмачево организован зональный авиаметеорологический центр НЗАМЦ, объединяющий все авиационные метеоподразделения города. Круглосуточно посменно в этих пунктах трудились 130 специалистов: наблюдатели, связисты, прибористы, электронщики, синоптики. Сегодня объем ручного труда сократился, так как почти все процессы наблюдений, составление карт погоды, передача сведений о погоде на высотах и у земли автоматизированы. При метео-

рологическом обеспечении авиации широко используются радио- и светолокаторы, информация с искусственных спутников земли, современные средства связи, электронно-вычислительная техника. На экранах дисплеев постоянно обновляется информация и метеопрогнозы всех российских и зарубежных аэродромов.

Почти 20 лет продолжалось самолетное зондирование атмосферы: вначале на самолете Ли-2 до высоты 7 км, проводившееся два раза в сутки, затем на самолете Ил-28 до высот 12 км. Такая разведка была очень важна в первые годы освоения воздушного океана.

Для изучения гидрометеорологического режима вновь созданного Новосибирского водохранилища организовано два пункта метеорологических и гидрологических наблюдений: один вблизи плотины ГЭС (Обская ГМО), другой в 80 км от него (ст. Остров Дальний).

Результаты наблюдений публикуются в ежегодниках и справочниках и широко используются в водохозяйственных целях, при составлении прогнозов погоды.

В 1964 г. в Новосибирске открыт пункт градиентных наблюдений в приземном слое атмосферы, который был установлен на телевизионной мачте. К сожалению, он просуществовал недолго.

С целью подготовки кадров радистов-наблюдателей в Новосибирске открыто специальное учебное заведение — ГПТУ-7, отметившее недавно свое 50-летие. При нем работает метеостанция Учебная, где проводятся регулярные наблюдения с 1962 г. Эти данные также публикуются в справочниках и используются в исследованиях климата и его изменений.

Регулярные наблюдения за загрязнением атмосферы в крупнейших городах России, в том числе и в Новосибирске, начались в 1961 г. В 1966 г. вступил в строй наземный комплекс пункта приема информации с искусственных спутников Земли, расположенный в 12 км от поселка Новый к юго-востоку от Академгородка. Использование спутниковых данных — это революционный этап в развитии метеорологии. Кстати, в том же году снимки облачности из космоса впервые были использованы в работе Государственной комиссии при расследовании причин авиапроисшествия с самолетом Ту-104 на аэродроме Толмачево.

Кроме метеорологических станций Росгидромета существуют так называемые ведомственные станции, где также ведутся метеорологические наблюдения. Работают такие станции с 1949 г. в Новосибирском ботаническом саду СО РАН, с 1959 г. — в Тулинском учебном хозяйстве Новосибирского аграрного университета. Это фенологические станции, изучающие зависимость явлений живой природы от условий пого-

ды. В 1960 г. открыты биоклиматические станции в Заельцовском и Речкуновском санаториях, задача которых — изучение микроклимата санаториев и его влияние на больных. Материалы наблюдений этих станций используются для мезоклиматического районирования Новосибирска и в лечебной практике.

С 40-х годов прошлого века и до настоящего времени широко используются метеорологические радиолокаторы для получения информации о скорости и направлении ветра и других характеристиках атмосферы до высот 30 км путем отслеживания движения радиозонда. Работает пункт локационного контроля за грозовой деятельностью в теплое время года, охватывая территорию радиусом 300 км.

В 50—60-х годах прошлого столетия в городском аэропорту и в Толмачево проводились эксперименты для рассеивания низких облаков и туманов с использованием наземных и воздушных средств. Однако из-за возникших серьезных организационных проблем практического применения эти опыты не получили ни в Новосибирске, ни в других регионах, где они проводились (Москва, Иркутск, Алма-Ата). Однако физический эффект опытов потрясает воображение, когда вместо тумана выпадает снег и светит яркое солнце.

Наблюдения и эксперименты в атмосфере (турбулентность)

Существует целая группа метеорологических явлений, которые не регистрируются обычными приборами, а обнаруживаются в атмосфере только во время полета. К ним относятся атмосферная турбулентность, электрические разряды в самолет, обледенение воздушных судов. Для изучения таких явлений проводятся экспедиционные исследования, разрабатывается специальная аппаратура. Использование такого рода нестандартной информации очень важно для проектирования новых типов летательных аппаратов и в летной практике, и при метеорологическом обеспечении полетов. Поэтому наряду с традиционными данными, обычно содержащимися в климатических справочниках, для г. Новосибирска и его окрестностей получен целый ряд новых дополнительных сведений о климате свободной атмосферы, обобщенных в [2—4].

Большая потребность в справочных климатических сведениях возникает у специалистов, занимающихся вопросами планирования полетов. В работе [4] такие сведения впервые получены на основе механизированной обработки ежечасных метеорологических наблюдений в аэропорту Новосибирск. Проведен анализ годового и суточного хода повторяемости горизонтальной видимости, ветра, условий погоды различной сложности, опасных для авиации явлений погоды. Эта информация необходима при составлении расписания полетов с целью минимизации

погодных рисков. Подобные данные получены позднее и для аэродрома Толмачево [5].

Термин «турбулентность атмосферы» вторгся в реактивную авиацию внезапно, и люди дорого заплатили, пока поняли, с чем имеют дело. В первые годы эксплуатации реактивных самолетов одна катастрофа следовала за другой. Причина — хаотические вихревые движения воздуха на границах струйных течений, в зоне гроз, вблизи гор. На турбулентность началось наступление. Одним из важных участков этого «фронта» стал Новосибирск.

В Сибирском научно-исследовательском институте авиации совместно с Западно-Сибирским управлением Гидрометслужбы в 1959—1964 гг. были проведены широкомасштабные летные исследования турбулентности в слое атмосферы от 8 до 12 км. Весь летный парк самолетов Ту-104 (тогда 114 единиц) был оснащен специальными приборами-акселерографами. За 4 года полетов были собраны инструментальные данные о турбулентности при суммарном налете 40 млн км. Эти данные были систематизированы по участкам авиатрассы Москва—Хабаровск и по каждому аэродрому, в том числе и для Новосибирска. Получены статистические характеристики параметров турбулентности: горизонтальная и вертикальная протяженность, интенсивность, время существования зон; выявлены аэросиноптические условия ее появления и исчезновения, даны рекомендации к прогнозу, учитывая новизну и важность информации. Эти сведения включены в Государственный стандарт по разделу «Атмосфера», а также в Методические рекомендации по условиям полетов в зоне гроз и струйных течений», изданных Гидрометеоздатом.

В 1970-х годах были проведены новые летные эксперименты на территории Сибири и Казахстана, в том числе и в районе Новосибирска. Для изучения особенностей явления турбулентности в нижнем слое атмосферы (50—500 м) был специально разработан комплекс бортовой аппаратуры, позволяющей оценивать пульсации вертикальных порывов ветра в земной системе координат. Три одинаково оборудованных самолета Ан-2 при полете один над другим осуществили съемку турбулентности на суммарном расстоянии 235 000 км. На основании полученных данных разработан и внедрен в прогностическую практику метод диагноза и сверхкраткосрочного прогноза турбулентности для территории, охваченной экспериментом: Обь-Иртышского, Западно-Сибирского, Среднесибирского управлений Гидрометслужбы и Республики Казахстан. Авторский коллектив из СибНИА, СибНИГМИ и Западно-Сибирского регионального вычислительного центра по итогам конкурса

был удостоен ведомственной премии Росгидромета за лучшую научно-исследовательскую работу в 1984 г.

Основные результаты изучения климата атмосферной турбулентности показали значительные особенности ее проявления в верхних слоях тропосферы и на нижних уровнях пограничного слоя.

Турбулентность в горизонтальном полете на эшелонах 8—10 км проявляется обычно в виде чередующихся толчков и бросков, испытываемых самолетом во время полета. При этом возникают добавочные ускорения (перегрузки), которые измеряются в долях ускорения или силы тяжести (g). Для каждого типа самолета существует определенная величина перегрузки, превышение которой может привести к повреждению или даже разрушению самолета.

Отношение суммарного времени пребывания самолета в турбулентных зонах к общей продолжительности полета называется коэффициентом встречаемости (K) и выражается в процентах. На трассе Москва—Хабаровск турбулентность возникает наиболее часто на участках Чита—Могоча ($K = 8,4$), Казань—Красноуфимск ($K = 6,2$), Ачинск—Нижеудинск ($K = 5,8$).

Вероятность встречи самолетов с турбулентностью в нижней тропосфере на участках набора высоты и снижения наибольшая над Екатеринбургом (30 %), минимальная — над Хабаровском (19 %). Над Москвой, Омском, Новосибирском и Иркутском она составляет 23—26 %, т. е. в среднем каждый четвертый полет сопровождается турбулентностью (рис. 1).

Вероятность турбулентности резко убывает с высотой от нижнего километрового слоя (37 % с болтанкой) до высоты 7 км (3 %), а выше несколько возрастает (до 10 %). Обнаружено явное преобладание слабой и умеренной турбулентности над сильной. Необходимым условием появления последней является наличие струйного течения со скоростями порядка 200 км/ч и резкое изменение скорости потока при полете вдоль или поперек струи (20—50 км/ч на 100 км).

Турбулентность может достигать штормовой силы более 1,0 g , проявляясь в виде резких внезапных бросков, если полет проходит над центром молодого циклона. Рекордный по интенсивности вертикальный порыв и перегрузка величиной 1,4 были зарегистрированы на высоте 8 км на участке полета Новосибирск—Кемерово 11.X.1959 г. Падение давления у земли в передней части волнового циклона диаметром 500 км превысило 20 гПа, а в центре роста — более 10 гПа за 3 ч. Порывы ветра у земли достигали 40 м/с и приводили к большим разрушениям. Кстати, циклонов с такими характеристиками в последующие 50 лет в Сибири не наблюдалось.

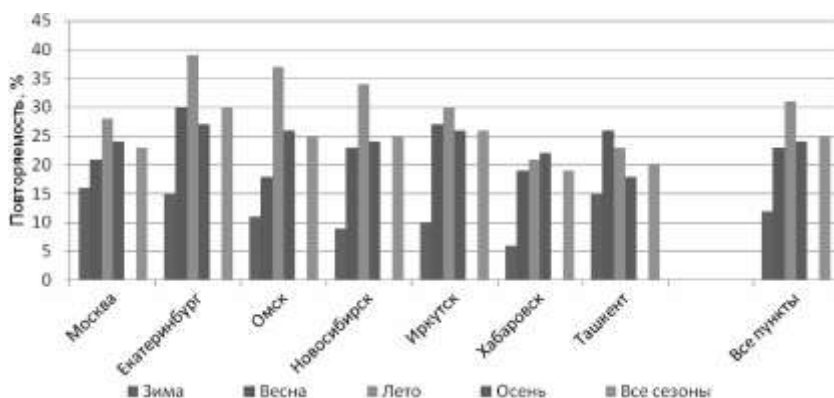


Рис. 1. Повторяемость полетов в условиях турбулентности

Интенсивность турбулентности на малых высотах определяется суммарным действием термических и динамических факторов с учетом времени суток, широты места и ряда других факторов, объединенных в модель. Географические районы, отличающиеся сезонными максимумами повторяемости сильного ветра одновременно являются очагами роста интенсивности турбулентности в приземном слое атмосферы. К таким районам в холодный период года относится юго-восток Западной Сибири и равнинная часть Алтайского края. Летом уровень турбулентности в среднем на 40 % выше, чем зимой, и растет в направлении с севера на юг.

Исследования климата Новосибирска

Первые сведения о климате города Новосибирска можно найти в монографии Л.И. Колдомасова «Климат Западной Сибири» (1947 г.) [6]. Небольшая по объему (58 страниц) книга дает достаточно полное представление о климате региона расположения Новосибирска на основе анализа средних многолетних величин и различного рода повторяемостей практически всех параметров климата: солнечное сияние и облачность, температура воздуха, влажность воздуха, атмосферные осадки и др.

Кроме того, исходя из своих творческих пристрастий, автор включил в работу целый ряд климатических характеристик, которые были предназначены для прикладных задач сельского хозяйства: испарение, засухи, суховеи, показатели потребности полевых культур в осадках в различные периоды развития. Для исследования использованы данные

самого первого климатического справочника, обобщающего данные с момента начала работы станций по 1935 г.

Лев Ильич Колдомасов (1907—1985) заложил основы прикладной климатологии Западной Сибири. Он окончил Московский гидрометеорологический техникум, затем в тяжелые годы коллективизации, в 1931 г. — институт, получив вместе с дипломом направление в Новосибирское управление Гидрометслужбы, где принял под свое начало отдел климата. Участник Великой Отечественной войны, после демобилизации в 1946 г. он трудился в качестве педагога в Новосибирском сельскохозяйственном институте, затем в лаборатории климатологии и теплофизики Сибирского зонального института экспериментального проектирования.

С 1965 г. и до конца своей творческой деятельности Л.И. Колдомасов возглавлял направление прикладной климатологии в Новосибирском филиале Московского научно-исследовательского института агроклиматологии (НИИАК), а затем в ЗапСибНИГМИ.

Большой объем экспедиционных микроклиматических наблюдений, выполненных коллективом отдела, позволили изучить важные процессы взаимодействия системы климат — хозяйственная деятельность человека. Как ученый, Л.И. Колдомасов предвосхитил важность взаимодействия производителя и потребителя климатической информации.

Интенсивный рост развития города, смена его экологии и новые запросы экономики — все это привело к необходимости более полного описания климата самого крупного развивающегося города Западной Сибири. В 1979 г. вышел в свет фундаментальный труд — коллективная монография «Климат Новосибирска» [7], вошедшая в серию работ «Климат городов», под методическим руководством Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (Санкт-Петербург) и под редакцией заслуженного деятеля науки Российской Федерации, доктора географических наук, заведующего отделом климатических исследований СибНИГМИ С.Д. Кошинского. В целом работа выполнена силами сотрудников лаборатории по изучению климата больших городов под руководством ведущих климатологов института В.Л. Кухарской и И.А. Изнаирской.

В книге содержатся результаты многолетних исследований климата Новосибирска по данным за период с начала наблюдений 1891 по 1975 г. В ней рассматриваются закономерности радиационных, циркуляционных и физико-географических факторов, определяющих климатические условия Западной Сибири. Дается описание температуры воздуха и почвы, влажности воздуха, осадков, снежного покрова, облачности и атмосферных явлений, приводится подробная климатическая характеристика сезонов года в г. Новосибирске.

Особое внимание уделяется состоянию загрязнения атмосферного воздуха, санитарно-гигиенической оценке климата, а также особенностям климата большого города с учетом застройки территории, покрытия улиц, размещения промышленных предприятий и транспорта. Получены количественные характеристики, свидетельствующие о том, что в результате застройки, деятельности городского хозяйства, функционирования промышленности нарушается радиационный баланс территории, снижается интенсивность перемешивания воздуха, повышается по сравнению с пригородом температура воздуха, наблюдаются и другие эффекты антропогенного характера.

Одна из глав монографии посвящена вопросу внутривековых изменений климата Новосибирска, касающихся в основном колебаний температуры воздуха и атмосферных осадков. Важно отметить, что ряды температуры воздуха с начала прошлого столетия вплоть до 1975 г. никаких оснований для выводов о потеплении климата не давали.

Указанные работы в наше время — библиографическая редкость, однако их значение как исторических данных о климате представляют особую ценность, прежде всего, для оценок наблюдающихся его изменений.

В 60—70-е годы прошлого столетия активно проводились климатологические исследования для обеспечения различных сторон жизнедеятельности Новосибирска в процессе реализации градостроительных решений. Результатом многолетних совместных исследований микроклимата города совместно с Институтом строительства и архитектуры явились работы по оценке широкого спектра микроклиматических особенностей различных типов жилой застройки Новосибирска в летний период [8], с учетом эффекта мелиоративных мероприятий [9], с разным уровнем озеленения и залесенности (на примере новосибирского Академгородка) [10]. Получены оценки микроклимата с точки зрения теплоощущений человека и условий дискомфорта в разных типах застройки. С этой деятельностью связаны имена зав. лабораторией прикладной климатологии СибНИГМИ Т.Е. Ковалевой, с. н. с. Л.Я. Школлер и профессора НИСА В.М. Пивкина.

Исследования воздействия изменчивости погодных условий на больных сердечно-сосудистыми заболеваниями в Новосибирске [11] должны были положить начало сотрудничеству Сибирского филиала Академии медицинских наук СССР (в настоящее время — СО РАМН) и СибНИГМИ в области биоклиматологии и климатопатологии.

В последнее время появляются неоднозначные оценки в отношении дальнейших тенденций изменения климата и обостряются дискуссии,

касающиеся природы глобального потепления, среди которых доминирует две точки зрения — влияние антропогенного фактора, ставшего официальной позицией на мировом уровне, и воздействие естественных факторов. В связи с этим для обоснования антропогенной позиции Росгидромет организует деятельность по инвентаризации парниковых газов, в том числе и озона.

Региональным вкладом в эту задачу являются исследования изменчивости содержания приземного озона в атмосферном воздухе города Новосибирска в зависимости от метеорологических факторов [12]. В качестве исходных данных использованы стационарные наблюдения за концентрацией озона в 2003—2005 гг. в Новосибирске — одним из 20 пунктов наблюдения на территории России.

Выявлено, что каждый из метеорологических факторов — температура, ветер, осадки, атмосферные явления, вносят свою лепту в формирование концентраций приземного озона в Новосибирске, вместе с тем наибольшие величины концентраций в основном определяются адвекцией воздушных масс, поступающих из южных территорий, где активно протекают фотохимические процессы образования озона.

Новосибирск в климатических справочниках

Климатические данные по сети метеорологической сети станций, в том числе и Новосибирску, представлены в справочниках, которые регулярно переиздаются (примерно через 15—20 лет), причем не только с включением в расчеты последних данных, но и с постоянным расширением климатических характеристик. Это связано как с возросшими возможностями вычислительной техники и новыми методическими разработками климатологической науки, так и с растущими запросами практической деятельности в различных отраслях экономики и социальной сфере.

К настоящему времени накоплено пять поколений справочников по климату — обобщения за весь период наблюдений соответственно по 1935, 1950, 1960, 1980 и 2005 гг. Последнее издание «Климат России» — электронная версия справочника, содержит наиболее полный перечень климатических характеристик.

Подготовка климатических справочников всегда сопряжена с необходимостью проведения контроля баз данных основных параметров климата. В рамках этой задачи при создании электронной версии справочника «Климат России» выполнена оптимизация способов контроля достоверности исходной информации по данным станций на территории Сибирского федерального округа [13].

Технология контроля достоверности исторических данных снежного покрова по постоянной рейке на основе комплексации статистических и логических методов, где в качестве опытного пункта привлечена станция Огурцово, изложена в работе [14]; в 2009 г. технология внедрена в Новосибирский ЦГМС—РСМЦ.

Развитие исследований климата Новосибирска

К середине 70-х годов прошлого столетия относится начало глобального потепления, и проблема изменения климата становится одной из главных и масштабных проблем современности, что нашло первостепенное отражение при описании климата городов в последующие годы [15—18].

В условиях климатической неустойчивости жизнедеятельность в крупных городах становится все более зависимой от погодно-климатических условий, и режимная продукция используется в различных направлениях, главными из которых являются:

- планирование социально-экономического развития, в том числе совершенствование градостроительства, улучшение экологической обстановки, исходя из того, что «города не должны вступать в противоречие с природой» [19];

- управление процессами жизнедеятельности в социально-экономических отраслях: энергетика, транспорт, коммунальное хозяйство, здоровье населения.

Совершенно очевидно, что актуальность исследований климата г. Новосибирска на основе обновленных данных за последнее 30-летие не вызывает сомнения.

В настоящее время СибНИГМИ совместно с Новосибирским ЦГМС-РСМЦ выполняют работы по созданию научно-справочного пособия «Климат Новосибирска».

Одним из первых этапов исследования стали оценки многолетней динамики основных параметров климата. На рис. 2 представлен ход 11-летних скользящих средних значений температуры воздуха за зимний период (ноябрь—март). Видно, что потепление зим в Новосибирске проявилось достаточно заметно в последнее 40-летие, начиная с периода 1965—1975 гг. Самыми теплыми за 110 лет в Новосибирске являются два 11-летия — 1988—1998 и 1999—2009 гг., температура обоих периодов равна $-11,4^{\circ}\text{C}$. Наиболее холодным было 11-летие 1945—1955 гг. ($T = -15,2^{\circ}\text{C}$). Скользящие периоды осреднения обладают большой инерционностью процесса, однако учащение холодных зим в новом



Рис. 2. Временной ход средней температуры воздуха (скользящие 11-летние средние). Зима (ноябрь—март)

столетия (январь 2006 г., зима 2009/10 г.) обозначило некоторую стабилизацию температур.

Широкий спектр характеристик за период 1966—2009 гг., в том числе зафиксированные экстремумы климатических параметров, дают обновленное представление о текущем состоянии климата города и его изменчивости: радиационного термического, ветрового режимов, характеристик снежного покрова, атмосферных явлений.

Особое внимание уделяется режиму опасных для города явлений, способных нанести значительный ущерб экономике и населению, и создаваемых ими рисков. К настоящему времени установлено, что при значительной повторяемости ветров 25 м/с и более, включая порывы и шквалы, на территории Новосибирской области, в самом Новосибирске по данным станций Учебная, Огурцово за период наблюдений с 1985—2007 гг. не отмечено ни одного случая ветра и шквала со скоростью ветра, превышающей 25 м/с.

Между тем горожане, наверняка, запомнили шквал и его последствия 21 июля 2009 г., нанесшего разрушения в разных частях г. Новосибирска: упали три строительных крана, повреждены крыши административных зданий и транспортные средства упавшими деревьями. Всего от стихии пострадали 15 объектов, материальный ущерб в городе составил 6 млн руб.

Следует, однако, отметить, что по данным наблюдательных подразделений Новосибирска (Толмачево, Огурцово) был зафиксирован ветер, не превышающий 23 м/с, в то время как по масштабам разрушений его скорость оценена в пределах 27—31 м/с по шкале Бофорта.

И только благодаря создавшемуся комплексу неблагоприятных явлений (гроза, дождь) данный случай шквала занял место в ОЯ.

Прикладное значение имеют показатели транспортно-климатических ресурсов, специализированные характеристики скользкости и снегозаносимости дорог, предназначенные для задач содержания автомобильных дорог; климатические данные отопительного периода (продолжительность, дефицит тепла) и его динамика как основного показателя для формирования стратегии энергоэффективности и энергосбережения, а также ряд биоклиматических показателей, отражающих тепловые стрессы человека.

В условиях континентального климата при определенных состояниях погоды летом создается угроза здоровью человека, пребывающего на открытом воздухе. Совместное воздействие высоких температур (27°C и выше) и относительной влажности воздуха (не менее 40 %) оценивается с помощью «индекса жары» [20]. Категория опасности, критические границы индекса и характеристика возможных последствий воздействия на здоровье человека представлены в таблице.

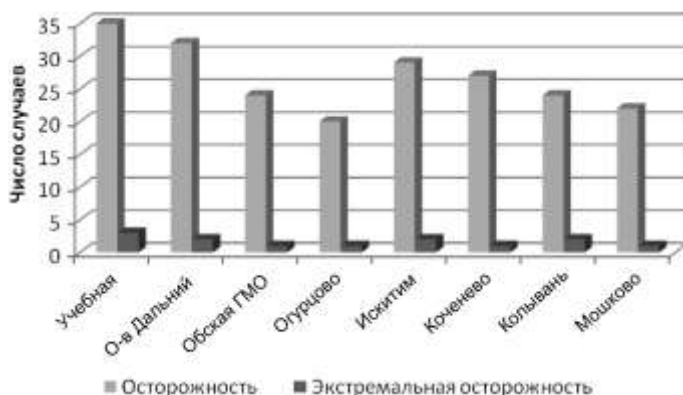


Рис. 3. Годовое число случаев с индексом жары различной категории воздействия

**Характеристика теплового воздействия при различных
индексах жары**

Категория	Индекс жары, °С	Возможные расстройства здоровья для населения в группах высокого риска
Экстремальная опасность	54 и выше	Тепловой или солнечный удар
Опасность	41—54	Солнечный удар, мышечные судороги, спазм сосудов от перегрева*
Экстремальная осторожность	32—41	Возможны солнечный удар, мышечные судороги и спазм сосудов от перегрева*
Осторожность	27—32	Переутомление*

* При длительном воздействии или физической активности.

Согласно полученным расчетам, из всех категорий опасности воздействия жары для Новосибирска и его окрестностей характерны два — «экстремальная осторожность» и «осторожность» (рис. 3).

В заключение отметим, что исследования климата крупнейшего города России следует развивать в направлении обогащения и наполнения их новыми видами адресной климатической информации, ориентированной на принятие климатообусловленных решений с целью устойчивого развития Новосибирска на долгосрочную перспективу, обеспечения безопасности и улучшения качества жизни населения [21].

Литература

1. *Аэроклиматическая характеристика аэропорта Новосибирск* / Под ред. З.В. Торбиной. Новосибирск: НЗАМЦ, 1969. 144 с. Д.С.П.
2. *Барахтин В.Н.* Авиаметеорологическая станция (АМСГ) // Энциклопедия «Новосибирск». Новосибирск: Новосиб. кн. изд-во, 2003. 1071 с.
3. *Барахтин В.Н.* Методическое пособие по расследованию авиапроисшествий и инцидентов, связанных с метеорологическими причинами / Под ред. Ю.В. Варагушина. М.: Росгидромет, 1994. 74 с.
4. *Барахтин В.Н., Дедов В.П., Колмаков А.Я.* Турбулентность в нижнем слое атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1989. 200 с. Д.С.П.
5. *Климатическая характеристика аэродрома Толмачево.* Новосибирск, 2001. 206 с.
6. *Колдомасов Л.И.* Климат Западной Сибири. Новосибирск: Новосибиргиз, 1947. 58 с.
7. *Климат Новосибирска* / Под ред. С.Д. Кошинского, К.Ш. Хайруллина, Ц.А. Швер. Л.: Гидрометеониздат, 1979. 223 с.
8. *Ковалева Т.Е., Пивкин В.М., Школлер Л.Я.* Исследование микроклимата жилой застройки и квартир в летний период в Новосибирске // Труды НИИАК. 1967. Вып. 48. С. 91—96.

9. *Пивкин В.М., Школлер Л.Я.* Микроклиматический эффект различных мелиоративных мероприятий в городской застройке // В помощь проектировщику-градостроителю. Планировка и застройка городов. Вып. 5. Киев: «Будівельник», 1970. С. 70—72.
10. *Школлер Л.Я., Пивкин В.М., Добринский А.А.* Микроклиматические особенности застройки в условиях залесенной местности (на примере Новосибирского Академгородка) // Труды ЗСРНИГМИ. 1977. Вып. 27. С. 113—124.
11. *Соломатин А.П., Непомнящих Л.М., Василенко Е.Ф.* Влияние погодных условий на осложнения и летальные исходы при сердечно-сосудистой патологии в Новосибирске // Труды ЗСРНИГМИ. 1975. Вып. 16. С. 129—133.
12. *Селегей Т.С., Филоненко Н.Н., Ленковская Т.Н., Казьмин О.Е.* Содержание приземного озона в атмосферном воздухе города Новосибирска // Труды СибНИГМИ. Вып. 105. С. 148—156.
13. *Лучицкая И.О., Белая Н.И., Филоненко Н.Н.* Оптимизация методов контроля качества климатических рядов высоты снежного покрова // Труды СибНИГМИ. 2006. Вып. 105. С. 68—82.
14. *Лучицкая И.О., Белая Н.И., Александрова Е.А.* Технология контроля достоверности исторических данных высоты снежного покрова по постоянной рейке.
15. *Исаев А.А., Гутников В.А., Шерстюков Б.Г.* Научно-прикладной справочник по климату Москвы. Сер. 2, ч. 3. Данные за отдельные годы. Вып. 1. 2002. 160 с.
16. *Климат, погода, экология Москвы* / Под ред. Ф.Я. Климова. СПб.: Гидрометеиздат, 1995. 438 с.
17. *Переведенцев Ю.П., Верецагин М.А., Наумов Э.П., Шанталинский К.М., Шафикова Р.Б.* Климат Казани и его изменения в современный период. Казань: Изд-во «Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина», 2006. 215 с.
18. *Клімат Києва* / Під ред. В.М. Волощука, Н.Ф. Токар. Київ: МП «Мапа ЛТД», 1995. 80 с.
19. *Романова Е.Н., Гобарова Е.О., Жильцова Е.Л.* Методы использования систематизированной климатической и микроклиматической информации при развитии и совершенствовании градостроительных концепций. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 159 с.
20. *Руководство по специализированному обслуживанию экономики* / Под ред. Н.В. Кобышевой. — СПб.: Астерион, 2008. 234 с.
21. *Генеральный план развития г. Новосибирска на 2007—2030 годы.* Новосибирск: Новосиб. кн. изд-во, 2007. 327 с.

УДК 551.509.313

Современные оперативные системы численного прогноза погоды для ограниченной территории / Р.М. Вильфанд, Г.С. Ривин, И.А. Розинкина. Труды СибНИГМИ. 2011. Вып. 106. С. 5—12.

Дается краткая история развития численного краткосрочного прогноза погоды для ограниченной территории в Сибири, проводившейся под руководством академика Г.И. Марчука. Так как для проведения численных прогнозов необходимы данные на боковых границах области интегрирования, приводится краткая информация о современном состоянии глобальных прогностических моделей и планах их развития в 2011—2012 гг., а затем уже аналогичная информация для моделей прогноза погоды по ограниченной территории. В остальной части статьи описано состояние на данный момент системы краткосрочного прогноза погоды COSMO-RU и краткие выводы.

Табл. 2. Библ. 14. Ил. 3.

УДК 551.509.33

«Кассандра-Сибирь» — технология подготовки долгосрочных гидрометеорологических прогнозов по Сибири / Н.Н. Завалишин, Г.М. Виноградова, Н.В. Пальчикова, Л.Н. Романов, Е.Г. Бочкарева, З.С. Орлова. Труды СибНИГМИ. 2011. Вып. 106. С. 13—25.

Технология разработана в Лаборатории долгосрочных гидрометеорологических прогнозов на основании многолетнего опыта работы с автоматизированным рабочим местом синоптика «Кассандра-900» и «Кассандра-2000» для Восточной и Западной Сибири соответственно. «Кассандра-Сибирь» предназначена для выпуска гидрометеорологических прогнозов с заблаговременностью 10 дней, месяц, сезон и год для территории Западной и Восточной Сибири и прилегающих территорий, для повышения качества прогнозов и для научных исследований. В статье представлена детальная структура технологии: архив многолетних данных, интерфейс, программы для расчета прогноза, канал получения оперативных данных. Технология внедрена в Иркутском и Новосибирском гидрометцентрах. Расширенная версия, предназначенная не только для оперативной работы, но и для научных исследований, внедрена в СибНИГМИ.

Библ. 10.

УДК 551.509.51

Развитие исследований в области интерпретации гидродинамических моделей атмосферы для прогноза характеристик погоды до пяти суток / М.Я. Здерева. Труды СибНИГМИ. 2011. Вып. 106. С. 26—32.

Рассматриваются основные направления исследований в области создания автоматизированных физико-статистических прогностических схем в СибНИГМИ: автоматизация всех блоков подготовки, расчетов и рассылки прогнозов; детализация прогнозов по времени; детализация прогнозов по пространству; переход на прогнозы редких явлений; прогноз комплексных метеорологических явлений; прогноз условий возникновения стихийных бедствий по метеорологическим факторам. Главные модификации базируются на эволюции гидро-

динамических моделей атмосферы, на развитии вычислительной техники, на применении новых статистических алгоритмов (МГУА и DW). Результатом деятельности является более 20 внедренных методов.

Библ. 24.

УДК 551.510.522:547.281.1

Диагноз экстремальных концентраций формальдегида в г. Томске на основе численного моделирования / В.А. Шлычков, Т.С. Селегей, В.М. Мальбахов, А.А. Леженин. Труды СибНИГМИ. 2011. Вып. 106. С. 33—43.

Представлена численная модель для реконструкции поля загрязнения пограничного слоя атмосферы формальдегидом. Модель адаптирована к природно-географическим условиям г. Томска. Проводится оптимизация параметров уравнения переноса и диффузии примеси для обеспечения адекватности расчетных характеристик. Ветровой режим орографически неоднородной территории воспроизводится с помощью однослойной гидродинамической модели при условии устойчивой стратификации приземного слоя. Результаты расчетов представляют распределение экстремальных концентраций формальдегида по территории города и окрестностей. Проведена оценка относительного вклада выбросов автотранспорта в общее загрязнение городской атмосферы.

Табл. 1. Ил. 3. Библ. 8.

УДК 551.5.001.57

Статистическое моделирование погоды с использованием глобальной информации / Л.Н. Романов. Труды СибНИГМИ. 2011. Вып. 106. С. 44—53.

Рассматриваются возможности крупномасштабного моделирования процессов в атмосфере на основе статистических критериев. Временные ряды регулярных атмосферных наблюдений служат основой для восстановления пространственно-временных связей, которые позволяют предсказать развитие процесса на шаг вперед. Для этой цели исходное многомерное распределение ситуаций представляется в виде совокупностей простых распределений, и неизвестная функция восстанавливается для каждого из таких распределений отдельно. При этом аппроксимация функций с использованием критерия среднего риска осуществляется одновременно как по времени, так и по пространству. Это позволяет использовать существующие ряды данных с наибольшей эффективностью. Сформулированы основные отличия и основные преимущества предложенной модели по сравнению с традиционными методами глобального прогнозирования.

Библ. 5.

УДК 551.324.6

Динамика глобальных климатических событий за последние 150 тысяч лет / С.П. Казьмин, И.А. Волков. Труды СибНИГМИ. 2011. Вып. 106. С. 54—63.

Позже 150 тыс. л. н. климат Земли испытывал неоднократные глубокие колебания. Произошло обширное оледенение вплоть до умеренных природных поясов, а также гляциоэвстатическая регрессия Мирового океана до уровня порядка минус 200 м. Около 130 тыс. л. н. приток энергии возрос до максимума, установился теплый межстадиальный климат, при котором уровень Мирового океана поднялся до +40—50 м (земская трансгрессия), произошло таяние большинства равнинных ледников. Начался новый межледниково-ледниковый цикл. Позже 30 тыс. л. н. приток энергии к земной поверхности сократился до минимума. Возникло последнее континентальное оледенение, которое завершилось около 10 тыс. л. н. Климат приблизился к современному. Обосновывается первопричина космической энергии в динамике географической оболочки.

Ил. 3. Библ. 23

УДК 551.556.1

Режим сильных ветров и риски ущерба от их воздействия на территорию юго-востока Западной Сибири / И.О. Лучицкая, Н.И. Белая. Труды СибНИГМИ. 2011. Вып. 106. С. 64—88.

Представлена характеристика распределения по территории юго-востока Западной Сибири параметров режима ветра 25 м/с и более (включая порывы): вероятность опасного явления, продолжительность действия, площадь распространения. Приводятся оценки социального и экономического рисков ущерба от воздействия сильных ветров на основе методики ГГО. На примере Новосибирской области выполнена пространственная детализация составляющих риска, выделены районы с различной степенью риска и дана оценка эффективности детализации. Рекомендуются распределительный способ адаптации от воздействия ОЯ в пользу наиболее уязвимого юго-западного района области. За период 1985—2009 гг. отмечена тенденция уменьшения повторяемости сильных ветров и масштабов охвата, за исключением высокогорий Алтая. Дается сравнительная оценка потерь в экономике фактических и расчетных рисков. Показатели рисков являются сопоставимыми по величине.

Табл. 8. Ил. 8. Библ. 23.

УДК 551.509

Гидрологический долгосрочный прогноз в условиях Новосибирского водохранилища / Л.Н. Романов, Е.Г. Бочкарева, В.Ф. Богданова. Труды СибНИГМИ. 2011. Вып. 106. С. 89—102.

Дается описание модели для прогноза стоков и расхода воды в регионе Новосибирского водохранилища. Модель основана на линейном и кусочно-линейном восстановлении функций с использованием критерия минимума среднего риска. Для наполнения формальной модели физическим содержанием взяты различные метеорологические и гидрологические параметры для прогноза стоков и расхода воды на 1—4 месяца вперед. Проведены эксперименты на шести прогнозируемых месяцах (август—сентябрь) и получены оценки прогнозов за

период 2004—2008 гг. Анализ полученных результатов свидетельствует об относительной успешности прогнозов

Табл. 6. Ил. 2. Библ. 7.

УДК 504.062.2

Комплексная оценка экологической ситуации в условиях нефтедобычи на юге Западной Сибири / С.П. Казьмин, О.В. Климов. Труды СибНИГМИ. 2011. Вып. 106. С. 103—111.

Разработка нефтяных месторождений связана с пространственно-временными изменениями природных экосистем, загрязнением тяжелыми металлами, нефтепродуктами компонентов окружающей среды. В процессе мониторинговых исследований на лицензионных площадях Верх-Тарского, Малоичского и Восточно-Тарского нефтяных месторождений и прилегающих к ним территориям получена информация о состоянии и причинах загрязнения природной среды, необходимая для принятия решений в области обеспечения экологической безопасности и разработки мер по снижению негативных экологических и социальных последствий.

Ил. 1. Библ. 5.

УДК 63:551.5

О развитии в ГУ «СибНИГМИ» прикладного динамико-статистического моделирования для агрометеорологического обеспечения земледелия Урало-Сибирского региона / В.В. Набока. Труды СибНИГМИ. 2011. Вып. 106. С. 112—129.

Представлена хронология освоения динамико-статистической моделью продукционного процесса агроценоза «Погода—Урожай» с суточным разрешением, разработанной коллективом авторов ГУ «ВНИИСХМ» под руководством О.Д. Сиротенко, в качестве базового средства расчета необходимых параметров и характеристик посевов в условиях Урало-Сибирского региона. Показаны результаты разработки на ее основе прикладной динамико-статистической модели формирования урожая картофеля для условий Западной Сибири. Обозначены пути практического применения модели. Освещены результаты адаптации для условий Западной Сибири прикладной динамико-статистической модели формирования урожая яровых зерновых культур (ВНИИСХМ) на примере ярового ячменя и яровой пшеницы. Обсуждаются результаты применения прикладных динамических моделей для оценки сложившихся агрометеорологических условий формирования урожая и прогноза урожайности яровой пшеницы и картофеля по отдельным субъектам региона. Приведены результаты испытания и внедрения методов агрометеорологического обеспечения производства этих культур, базирующихся на динамико-статистических моделях формирования урожая.

Табл. 1. Ил. 5. Библ. 17.

УДК 551.511.42.001.572(571.14)

Закономерности длительного загрязнения атмосферы и снегового покрова г. Новосибирска / В.Ф. Рапута, В.В. Коковкин, А.Ю. Девятова, В.А. Чирков, О.Е. Казьмин. Труды СибНИГМИ. 2011. Вып. 106. С. 130—142.

Приведены результаты экспериментальных исследований загрязнения атмосферного воздуха и снегового покрова вблизи стационарных постов Гидрометеослужбы г. Новосибирска. Установлены качественные и количественные закономерности между содержанием ряда измеренных компонентов примеси в атмосфере и снеге, включающих сажу, бенз(а)пирен, взвешенные вещества, окислы азота, серы. Обсуждается возможность создания взаимодополнительной системы мониторинга и получения на ее основе более детальной оценки состояния длительного загрязнения атмосферы города.

Ил. 7. Библ. 19.

УДК 551.509.53

Автоматизированный прогноз температуры воздуха с обучением по методу группового учета аргументов / М.Я. Здерева, В.М. Токарев, М.В. Виноградова. Труды СибНИГМИ. 2011. Вып. 106. С. 143—151.

Цель работы — создание автоматизированной схемы расчетов прогнозов температуры воздуха по пунктам Западно-Сибирского региона на базе гидродинамических полей атмосферы. Описаны методические подходы к решению задачи. Основным отличием от предыдущих разработок является применение метода группового учета аргументов (МГУА) для построения устойчивых решений и DW-алгоритма для отбора информативных признаков. Исходные выборки построены по периодам года с учетом сезонной изменчивости температуры. Для кластеризации рабочих выборок внутри сезонов применено деление по изменениям в барическом поле и в поле температуры на АТ-850. Порогом служит знак ожидаемой тенденции (по суточной разности) давления и температуры в большинстве из 25 окружающих станцию узлов. В конечном итоге уравнения МГУА получены для каждой станции рассматриваемого региона отдельно для минимальной и максимальной температур воздуха.

Табл. 1. Ил. 1. Библ. 8.

УДК 551.509.51

Анализ и прогноз условий погоды, влияющих на концентрацию атмосферных примесей мегаполиса / М.Я. Здерева, В.М. Токарев. Труды СибНИГМИ. 2011. Вып. 106. С. 152—158.

На базе архивных данных наблюдений ЦМС Новосибирск за 2005—2008 гг. (10 постов, 11 примесей) и синхронных данных в узлах сетки ГРИБ выполнено построение логических решающих правил прогноза превышения ПДК по отдельным примесям на 1—3 суток. Принят комплекс методических мер по выявлению тонкой структуры скрытых и слабых статистических связей, разработан сбалансированный критерий построения дерева решений алгоритма

DW, получен готовый для оперативных испытаний метод и технология прогноза. Гибкость вероятностного подхода к построению логических деревьев оставляет возможность корректировки полученных решающих правил без повторного обучения выбором значений критерия отсека.

Табл. 3. Библ. 2.

УДК 504.3.054

Анализ временных рядов атмосферных примесей в городе Новосибирске / Р.Е. Келяшова, В.М. Токарев. Труды СибНИГМИ. 2011. Вып. 106. С. 159—167.

Выполнен графический и статистический анализ пространственно-временных рядов (2005—2008 гг., 10 постов) концентраций 11 примесей по г. Новосибирску, получены условные статистические оценки разложения дисперсии по осям многомерной матрицы данных наблюдений, показаны очевидные нарушения статистической однородности, стационарности и эргодичности рассматриваемых данных, не связанные с условиями погоды, оценены вклады многолетних трендов, сезонности и пространственной неоднородности по территории мегаполиса в общую дисперсию концентраций различных атмосферных примесей. Сделаны выводы о возможных механизмах формирования повышенных концентраций примесей мегаполиса и их рассеяния, в которых роль погодных условий не обязательно является преобладающей и ее выделение представляет сложную задачу типа распознавания слабого сигнала на фоне сильных помех, недоступную традиционным статистическим методам.

Табл. 3. Ил. 7. Библ. 1.

УДК 551.577.52

Оценка метеорологических условий для задач содержания федеральных дорог Новосибирской области / Н.И. Беляя, И.О. Лучицкая. Труды СибНИГМИ. 2011. Вып. 106. С. 168—180.

Выполнена оценка различных видов скользкости на участках федеральных автомобильных трасс Новосибирской области (М51, М52 и М53), обусловленной влиянием комплекса метеорологических условий. Выявлено, что на рассматриваемых трассах чаще всего неблагоприятные для автотранспорта условия создаются при выпадении снега и мокрого снега. Гололедные явления, являясь наиболее опасным видом скользкости, занимают второе место по повторяемости. Подробно рассмотрены характеристики снегопадов: число случаев, продолжительность, количество выпавшего снега, повторяемость в зависимости от температуры воздуха. Проанализированы случаи сильных снегопадов и их интенсивность.

Табл. 5. Ил. 2. Библ. 10.

УДК 551.511.61

Численная модель восстановления полей выпадений вулканического пепла по данным наблюдений / Т.В. Ярославцева, В.Ф. Рапута. Труды СибНИГМИ. 2011. Вып. 106. С. 181—187.

Предложена модель реконструкции полей выпадений крупнодисперсной примеси от непрерывного высотного источника. На данных натурных наблюдений выпадений вулканического пепла в окрестностях вулкана Чикурачки (о. Парамушир, Курильские острова) проведена апробация предложенной модели оценивания.

Ил. 2. Библ. 12

УДК 551.509

Особенности распределения, циркуляции и прогнозирования опасных явлений погоды в центральном районе Западной Сибири в разные периоды года / Т.В. Давидович, [Л.Е. Каминская], Э.А. Морозова. Труды СибНИГМИ. 2011. Вып. 106. С. 188—207.

Приводится описание физико-географических условий и пространственного распределения опасных явлений погоды в центральном районе Западной Сибири в разные периоды года. Выявлены очаги повышенной повторяемости опасных явлений погоды в переходные сезоны года (весна, осень), зимой и летом. Изучены особенности циркуляции при появлении опасных явлений погоды в центральной части Западной Сибири. При изучении структуры метеорологических полей проведена классификация атмосферных процессов, выявлены реально существующие над данным районом формы атмосферной циркуляции и специфика проявления их в физико-географических условиях исследуемой территории. Предложены методические рекомендации для прогноза опасных явлений погоды в центральном районе Западной Сибири. Разработанные рекомендации испытывались при прогнозировании опасных явлений на территории Ханты-Мансийского автономного округа в теплый период 2007—2009 гг. Общая оправдываемость прогнозов появления опасных и неблагоприятных явлений погоды составила 91,2 %.

Табл. 5. Библ. 15.

УДК 523.98

О зависимости максимумов чисел Вольфа от кривизны и кручения траектории движения Солнца относительно центра инерции Солнечной системы / Н.Н. Завалишин. Труды СибНИГМИ. 2011. Вып. 106. С. 208—218.

Рассматривается траектория движения Солнца относительно центра инерции Солнечной системы. Сделан переход в подвижную с Солнцем систему координат, определяемую репером Френе. Изложен алгоритм вычисления и найдены значения на интервале 1701—2050 гг. параметров вектора Дарбу по 5-точечной схеме. Показано, что в 24 случаях из 28 года максимальных значе-

ний чисел Вольфа находятся рядом с годами экстремумов в суммах аномалий кручения и кривизны траектории Солнца.

Табл. 1. Ил. 3. Библ. 7.

УДК. 551.582

История развития метеорологических наблюдений и исследований климата Новосибирска / В.Н. Барахтин, И.О. Лучицкая, Н.И. Белая. Труды СибНИГМИ. 2011. Вып. 106. С. 219—232.

Приведены исторические сведения о развитии метеорологических наблюдений в Новосибирске начиная с 1897 г. Описаны основные этапы развития и совершенствования системы наблюдений, включая данные специальных летных экспериментов, искусственных спутников Земли. Изложены результаты исследований турбулентности в свободной атмосфере над городом и по трассам полетов авиации. Дан анализ исследований климата г. Новосибирска, впервые представленного при описании климата Западной Сибири (1947 г.) и затем — в коллективной монографии «Климат Новосибирска» (1979 г.) Перечислены основные направления исследований климата Новосибирска на основе обновленных данных, с учетом современных тенденций, мезоклиматических и экологических особенностей, климатических ресурсов для различных видов социально-экономической деятельности мегаполиса.

Табл. 1. Ил. 3. Библ. 24.

Vil'fand, R.M., Rivin, G.S., Rozinkina, I.A. Modern operational systems for limited-area numerical weather forecast. SibNIGMI Proceedings. 2011. Issue 106. P. 5—12.

The paper presents a brief history of the development of numerical short-range limited-area weather forecast in Siberia under the guidance of academician G.I. Marchuk. Further, due the need for integration area lateral boundary data, the current state of global prediction models and their future development in 2011—2012 are shortly discussed. Then the analogous information on limited-area weather forecast models is given. In the rest part of the paper the current condition of the COSMO-RU system of short-range weather forecast is characterized followed by short conclusion.

Zavalishin, N.N., Vinogradova, G.M., Palchikova, N.V., Romanov, L.N., Bochkareva, E.G., Orlova, Z.S. Cassandra-Siberia: technology of preparing long-range hydrometeorological forecasts for Siberia. SibNIGMI Proceedings. 2011. Issue 106. P. 13—25.

Technology was developed in the Laboratory of long-range hydrometeorological forecasts based on many years' experience of operation of automated workstation Cassandra-900 and Cassandra-2000 for Eastern and Western Siberia, respectively. Cassandra-Siberia is designed for issue of hydrometeorological ten day, month, season, and year forecasts for the territory of Western and Eastern Siberia and adjacent territories; for improving forecasts; and for scientific research. The paper presents detailed structure of the technology: archive of long-term data, interface, programs for forecast calculation, and channel for getting operational data. Technology is installed in Irkutsk and Novosibirsk Hydrometeorological Centres. Extended version designed not only for operational work but also for scientific research is installed in the Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute.

Zdereva, M.Ya. Interpretation of hydrodynamic atmosphere models for 5-day weather prediction: experience of research in the Siberian Research Hydrometeorological Institute. SibNIGMI Proceedings. 2011. Issue 106. P. 26—32.

The paper presents main directions of research in the field of development of automated physico-statistical prognostic schemes in the Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute: automatization of all blocks of prediction preparation, calculation, and dissemination; time detalization of predictions; spatial detalization of predictions; adoption of rare event prediction; prediction of complex meteorological events; prediction of conditions for natural disaster occurrence based on meteorological factors. Main modifications are based on evolution of atmospheric hydrodynamical models, development of computer engineering, and application of new statistical algorithms (The Group Method of Data Handling (GMDH), and DW). Operating results include more than 20 implemented methods.

Shlychkov, V.A., Selegei, T.S., Mal'bakhov, V.M., Lezhenin, A.A. Calculation of extreme concentrations of formaldehyde in the city of Tomsk on the basis of numerical modeling. SibNIGMI Proceedings. 2011. Issue 106. P. 33—43.

A numerical model for reconstructing the pollution of the boundary layer of atmosphere by formaldehyde is presented. The model is adapted to the geographical conditions of Tomsk. The parameters of the equation of pollution transfer and diffusion are optimized. The wind field is calculated by a single-layer hydrodynamical model under the condition of stable stratification of the surface layer. Distributions of extreme concentration of formaldehyde over the city and its suburbs are calculated. An estimation of the relative contribution of emissions of motor transport to the total pollution of the city atmosphere is obtained.

Romanov, L.N. Statistical weather modeling utilizing global information. SibNIGMI Proceedings. 2011. Issue 106. P. 44—53.

The paper discusses potentials of large-scale modeling of atmospheric processes based on statistical criteria. Time series of regular atmospheric observations serve as a basis for renewal of space-time links allowing prediction of the process development for a step forward. For this purpose the initial multivariate distribution of situations is presented as a population of simple distributions, and the unknown function is restored for each distribution separately. Approximation of functions using average risk criterion is performed simultaneously in time and in space. This allows using the existing data series with maximum efficacy.

Main differences and advantages of the suggested model as compared with conventional methods of global prediction are formulated.

Kazmin, S.P., Volkov, I.A. Dynamics of global climatic events over the last 150 000 years. SibNIGMI Proceedings. 2011. Issue 106. P. 54—63.

During the preceding 150 000 years, the Earth climate underwent repeated deep fluctuations. The vast glaciation through to temperate geographical belts and glacio-eustatic regression of the world ocean down to the level of -200 m had happened. About 130000 years ago the energy inflow had reached the maximum, the warm interstadial climate had settled, the level of the world ocean had risen up to +40—50 m (Eemian transgression), and melting of the majority of plain glaciers had occurred. The new interglacial-glacial cycle had begun. After 30 thousand years ago the energy inflow to the Earth surface has been reduced to a minimum. The last continental glaciation had occurred and come to an end about 10,000 years ago. The climate had come nearer to the modern-day one. The space energy is proved to be a prime cause of the geographical envelope dynamics.

Luchitskaya, I.O., Belaya, N.I. Strong wind regime and wind damage risk in the south-east of Western Siberia. SibNIGMI Proceedings. 2011. Issue 106. P. 64—88.

The assessment of risks posed by strong winds in the south-east of Western Siberia (area of responsibility of the West Siberian Administration for Hydrometeorology and Environmental Monitoring) is presented, including those with a significant simultaneous coverage of the territory by dangerous phenomenon.

Regional specific features of the risk component regime are studied — probability of a hazard phenomenon and vulnerability of the territory represented by the characteristic of the area occupied by a hazard phenomenon. Spatial detalization of parameters was performed and areas with varying degrees of risk were identified on the example of Novosibirsk Region.

Results of the assessment of detalization effect suggested the possibility of application of the distributive method of adaptation to the area which is most vulnerable from the effects of strong winds, that is the south-western steppe zone.

A tendency towards lower frequency of strong winds and the extent of coverage was observed in the study area with the exception of the Altai high mountains.

Romanov, L.N., Bochkareva, E.G., Bogdanova, V.F. Long-term hydrologic prediction for the Novosibirsk water reservoir. SibNIGMI Proceedings. 2011. Issue 106. P. 89—102.

Description of the model for prediction of water runoff and discharge in the region of Novosibirsk reservoir is presented. The model is based on linear and piecewise linear recovery of functions using minimum average risk criterion. Filling of a formal model with physical content was performed using various meteorological and hydrological parameters for prediction of water runoff and discharge at a 4-month lead. Experiments at 6 predicted months (August–September) were performed, and prediction estimates for the period of 2004—2008 were obtained. Analysis of the obtained results testifies to a relative prediction success.

Kazmin, S.P., Klimov, O.V. Integral assessment of ecological situation in conditions of oil field development in southern region of Western Siberia. SibNIGMI Proceedings. 2011. Issue 106. P. 103—111.

Development of oil fields is associated with spatial-temporal changes in natural ecosystems, contamination of the environment components with heavy metals and oil products. Monitoring studies at licensed areas of Verh-Tarsky, Maloichsky, and Vos-tochno-Tarsky oil fields and adjacent territories provided the information on the environment condition and causes of its contamination. This information is required for decision making in securing ecological safety and planning of lowering adverse ecological and social impacts.

Naboka, V.V. On the development of applied dynamical statistical modeling for agrometeorological support to agriculture of the Ural-Siberian region. SibNIGMI Proceedings. 2011. Issue 106. P. 112—129.

The chronology of mastering dynamical statistical model «Weather-Yield» for an agrocoenosis production process with daily resolution is presented. The model was developed in the All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology

(ARRIAM) under the guidance of O.D.Sirotenko, as a primary tool for calculation of relevant parameters and characteristics of crops in conditions of the Ural-Siberian region. It served as a base for development of the applied dynamical statistical model for potato yield formation in conditions of Western Siberia presented in the paper. Methods of practical application of the model are outlined.

Results of adaptation of the ARRIAM's dynamical statistical model for spring crop yield to Western Siberia conditions are shown in terms of spring barley and spring wheat.

Results of using applied dynamical models for the assessment of existing agrometeorological conditions for the yield formation and spring wheat and potato yield prediction for separate districts are discussed. Results of testing and introduction of methods of agrometeorological support for the production of these crops based on dynamical statistical models for yield formation are shown.

Raputa, V.F., Kokovkin, V.V., Devyatova, A.Yu., Chirkov, V.A., Kazmin, O.E. Regularities of long-term pollution of the atmosphere and snow cover in Novosibirsk city. SibNIGMI Proceedings. 2011. Issue 106. P. 130—142.

Results of experimental studies of the pollution of atmospheric air and snow cover in the vicinity of Novosibirsk Hydrometeoservice net stationary posts are presented. Qualitative and quantitative dependences between the contents of some measured components of pollution in the atmosphere and snow cover, including soot, benzo(a)pyrene, suspended substances, and nitrogen and sulfur oxides are obtained. A possibility of development of mutually complementary monitoring system providing more detailed estimation of the long-term atmospheric pollution in the city is discussed.

Zdereva, M.Ya., Tokarev, V.M., Vinogradova, M.V. Computer-assisted air temperature forecasting with training using Group Method of Data Handling. SibNIGMI Proceedings. 2011. Issue 106. P. 143—151.

Objective of the study included development of computer-assisted calculation scheme for the air temperature forecasting over points of Western Siberia region based on atmospheric hydrodynamic fields. Methodological approaches to the task solution are described. The main difference with previous investigations is using the Group Method of Data Handling (GMDH) in production of stable solutions, and DW algorithm for selection of information signs. Original samples are arranged in accordance with year periods with account for seasonal variability of the temperature. Clustering working samples within seasons was performed by dividing in accordance with changes in pressure and temperature fields at the AT-850 level. Threshold was presented by a sign of expected pressure and temperature trends (daily difference) at a majority of 25 points surrounding the station. Eventually, GMDH equations were derived for every station of the studied region separately for minimum and maximum air temperatures.

Zdereva, M.Ya., Tokarev, V.M. Analysis and prognosis of weather conditions affecting air pollutant concentration in a megalopolis. SibNIGMI Proceedings. 2011. Issue 106. P. 152—158.

Logical decision rules for 1—3 day forecasting of the excess of individual pollutant's MAC (maximum allowable concentration) were built based on Novosibirsk observation data archive for 2005—2008 (10 stations, 11 pollutants) and synchronous data in the GRIB points. The complex of methodological measures for detection of fine structure of latent and poor statistical links was accepted, balanced criterion for derivation of tree of the DW algorithm solutions was developed, and the forecast method and technology ready for operational testing were obtained.

Feasibility of probabilistic approach to derivation of logical trees enables a correction of obtained decision rules without repeated training by means of the choice of truncation criterion values.

Kelyashova, R.E., Tokarev V.M. Time series analysis for atmospheric pollutants in Novosibirsk city. SibNIGMI Proceedings. 2011. Issue 106. P. 159—167.

Graphical and statistical analysis of space-time series (2005—2008, 10 stations) of eleven pollutant concentrations over Novosibirsk city was performed. Conventional statistical estimations of the dispersion decomposition along the axes of multidimensional matrix of observation data were obtained. Evident violations of statistical homogeneity, stationarity, and ergodicity of data, unrelated to weather conditions, were shown. Contributions of long-term trends, seasonality, and spatial inhomogeneity within the megalopolis to the total dispersion of different pollutant concentrations were assessed.

In conclusion possible mechanisms of elevated pollutant concentration formation and dispersion within the megalopolis without an imperative predominant role of weather conditions are discussed. Separation of the weather is a challenge such as low-power signal recognition against the background of intense noise what is beyond the reach of conventional statistical methods

Belaya, N.I., Luchitskaya, I.O. Evaluation of weather conditions for federal road maintenance in Novosibirsk region. SibNIGMI Proceedings. 2011. Issue 106. P. 168—180.

The evaluation of different types of slippery condition on federal motor roads of Novosibirsk region (M51, M52 and M53) determined by a complex of weather conditions was performed. It was found that adverse conditions for motor transport at these roads most commonly occurs from falling of snow and snow and rain mix (sleet). Glaze effects, being the most dangerous kind of slippery, rank second in frequency of occurrence. Snowfall characteristics are discussed in detail — incidence, duration, amount of snow, frequency depending on air temperature. Cases of heavy snowfalls and their intensity were analyzed.

Jaroslavtseva, T.V., Raputa, V.F. Numerical model for recovery of volcanic ash fallout fields. SibNIGMI Proceedings. 2011. Issue 106. P. 181—187.

The model for reconstruction of fields of fallout of particulate pollutant from continuous altitude source is suggested. The model was validated using field observation data of tephra fallout in the vicinity of Chikurachki volcano (Paramushir island, Kuriles).

Davidovich, N.V., Kaminskaya, L.E., Morozova, E.A. Peculiarities of distribution, circulation, and prediction of hazardous weather events in the central region of Western Siberia in different periods of the year. SibNIGMI Proceedings. 2011. Issue 106. P. 188—207.

Description of physiographic conditions and spatial distribution of hazardous weather events in the central region of Western Siberia in different periods of the year is presented. Hotbeds of increased incidence of hazardous weather events in mid--seasons (spring, fall), winter, and summer were identified.

Peculiarities of circulation in cases of hazardous weather occurrence in the central part of Western Siberia were studied. Investigation of the structure of meteorological fields included classification of atmospheric processes, identification of atmospheric circulation forms really existing over the given region and their specific pattern in physiographic conditions of the studied territory.

Guidelines for prediction of hazardous weather events in the central region of Western Siberia are presented. These Guidelines were tested in forecasting of hazardous events over the territory of Khanty-Mansi Autonomous Okrug for warm period of 2007—2009. Total accuracy of hazardous and adverse weather forecasting was 91.2 %.

Zavalishin, N.N. On the dependence between Wolf-number maxima and the Sun trajectory curvature and torsion relative to the Solar system's center of inertia. SibNIGMI Proceedings. 2011. Issue 106. P. 208—218.

The trajectory of the Sun path relative to the center of inertia of the Solar system was discussed. A transition to coordinate system co-moving with the Sun, namely the Frenet frame, was performed. Calculation algorithm was presented, and values at the 1701—2050 interval of the Darboux vector parameters according to 5—point scheme were read off. Years with Wolf-number maxima were shown to be close to years with extreme sums of curvature and torsion of the Sun trajectory in 24 cases out of 28.

Barakhtin, V.N., Luchitskaya, I.O., Belaya, N.I. The history of meteorological observations and climate research in Novosibirsk. SibNIGMI Proceedings. 2011. Issue 106. P. 219—232.

Historical information about the development of meteorological observations in Novosibirsk since 1897 is presented. Main stages in the development and improvement of observation systems, including special flight experiments and artificial satellites are described. Results of the study of turbulence in the free atmosphere above the city and along the aviation flight courses are reported.

The analysis of climate research in Novosibirsk, first presented in the description of climate of Western Siberia (1947), and then — in multi-author book *The Climate of Novosibirsk City* (1979) is performed.

The paper determines principal directions of climate research in Novosibirsk on the basis of updated data, taking into account current trends, mesoclimatic and ecological features, climate resources for various kinds of socio-economic activities of the megalopolis.