

МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

ТРУДЫ
СИБИРСКОГО РЕГИОНАЛЬНОГО
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Выпуск 108

ПРОБЛЕМЫ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ,
ЭКОЛОГИИ, КЛИМАТА СИБИРИ

Под редакцией
доктора физико-математических наук *В.Н. Крупчатникова*
кандидата технических наук *А.Б. Колкера*

НОВОСИБИРСК
2023

УДК 551.5
ББК 26.23
Т78

DOI: 10.55235/0320359X_2023_108_1

**Труды Сибирского регионального научно-исследовательско-
Т78 го гидрометеорологического института / под ред. В.Н. Крупчатни-
кова, А.Б. Колкера; Мин-во природ. ресурсов и экологии РФ, Феде-
ральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей
среды. – Новосибирск: СО РАН, 2023. – ISSN 0320-359X**

Вып. 108: Проблемы гидрометеорологических прогнозов, эколо-
гии, климата Сибири. – 2023. – 266 с.

ISBN 978-5-6049862-6-4

В сборнике представлены результаты прикладных исследований в области гидрометеорологии и смежных с ней областей, выполненных преимущественно для Сибирского региона на основе современных подходов к решению научных задач, с привлечением методов машинного обучения и т. п.

Для специалистов в области гидрометеорологии, экологии и смежных об-
ластей.

УДК 551.5
ББК 26.23

ISBN 978-5-6049862-6-4

© СибНИГМИ, 2023
© Оформление. Сибирское отделение
РАН, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Крупчатников В.Н., Гочаков А.В., Антохина О.Ю.</i> Исследование особенностей вихревых потоков импульса и тепла в области струйных течений	5
<i>Горбатенко В.П., Ананова Л.Г., Апостолиди Х.Т., Карпова А.А.</i> Аэросиноптические условия образования града над юго-востоком Западной Сибири	17
<i>Ананова Л.Г., Карпова А.А., Апостолиди Х.Т.</i> Синоптические условия образования гроз над юго-востоком Западной Сибири	29
<i>Колкер А.Б.</i> Сравнение эффективности методов оптического потока для автоматизиро- ванного определения смещения метеорологических полей	43
<i>Гуляев В.Т.</i> Глобальная климатическая модель циркуляции средней атмосферы и термосферы	57
<i>Токарев В.М.</i> Анализ методических и алгоритмических вопросов исследования и прогноза переходов температуры через ноль и связанных с ними гололедных явлений	71
<i>Завалишин Н.Н., Игнатов А.В., Бочкарева Е.Г., Пальчикова Н.В.</i> Анализ возможностей прогнозирования среднемесячной температуры воздуха и месячных сумм осадков на территории Западной Сибири с заблаговременностью до одного года	88
<i>Пицимко О.И., Гарафутдинова Л.В.</i> О возможности использования индекса дистанционного зондирования для прогнозирования урожайности картофеля (на примере Иркутской области)	104
<i>Здерева М.Я., Токарев В.М., Хлучина Н.А., Воробьева Л.П.</i> Оперативная технология краткосрочных прогнозов гололеда на территории Урало-Сибирского региона	112
<i>Здерева М.Я., Хлучина Н.А., Воробьева Л.П., Шепоренко Г.А., Адаренко Е.А., Виноградова М.В.</i> Результаты оперативных испытаний метода и технологии краткосрочного прогноза гололеда	122

<i>Мясникова О.А.</i> Временные изменения годового количества твердых осадков на территории Западной Сибири по данным их скорректированных значений за период 1936–2021 гг.	134
<i>Максютова Е.В., Башалханова Л.Б.</i> Низкие температуры воздуха на территории Иркутской области в условиях потепления климата.....	147
<i>Воронина Л.А., Лапчик А.М., Брусенко Е.А.</i> Климатические особенности юго-востока Западной Сибири	159
<i>Климов О.В., Топоров В.М.</i> Оценка современных климатических тенденций в Новосибирской области методом квантильной регрессии	184
<i>Климов О.В., Казьмин С.П.</i> Морфометрические особенности озера Кучукское и подземный сток в водоохранной зоне	195
<i>Калюжный И.Л.</i> Обоснование конструкции бассейна-имитатора для оперативного учета испарения с водной поверхности водохранилища.....	204
<i>Измайлова А.В., Фуксова Т.В., Дубровская К.А., Романова Л.М.</i> Изменения климатообусловленных составляющих приходной части водного баланса водохранилищ Ангарского каскада	220
<i>Яковлева Т.И.</i> Краткосрочный прогноз расходов воды на основе расчета динамических русловых водных балансов	246
<i>Саноцкая Н.А.</i> Долгосрочное прогнозирование максимальных уровней воды р. Пякупур с использованием нейросетевых технологий.....	258

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВИХРЕВЫХ ПОТОКОВ ИМПУЛЬСА И ТЕПЛА В ОБЛАСТИ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ

В.Н. Крупчатников^{1,2,4}, А.В. Гочаков², О.Ю. Антохина³

¹ФГБУН Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск

²ФГБУ «Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт», Новосибирск

³ФГБУН Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск

⁴ФГБУН Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва

Вихревые потоки в общей циркуляции часто рассматриваются как турбулентность, когда происходит вихревая диффузия определенных величин, таких как, например, потенциальный вихрь (ПВ), вдоль изоэнтропических поверхностей в свободной атмосфере.

Вихревые потоки определяются в первую очередь коэффициентами вихревой диффузии и являются градиентными по отношению к основному полю ПВ. Подтверждением этого предположения о турбулентной природе вихревых потоков ПВ в свободной атмосфере является тот факт, что они в среднем имеют градиентный характер. В данной статье мы обсудим некоторые результаты исследования процессов обрушения волн Россби в районе субтропического струйного течения [1]. Многие крупномасштабные динамические явления в атмосфере Земли связаны с процессами распространения и обрушения волн Россби [2–6]. Здесь мы обращаем внимание на области противогradientных вихревых потоков ПВ в районе субтропического струйного течения в Северном полушарии, связанные с опрокидыванием волн Россби. В некоторых случаях поток ПВ на север оказывается противогradientным, и такие потоки возникают в результате нелинейного обрушения волны Россби [7]. Также в ряде исследований было отмечено, что обрушение волны Россби является одним из наиболее важных механизмов взаимодействия стратосферы и тропосферы (например, в [12]). Конвергенция и дивергенция потока вихревого импульса вблизи тропопаузы соответствуют северному и южному потокам ПВ. Однако можно ожидать, что расход бароклининой вихревой кинетической энергии обычно сопровождается противогradientным вихревым переносом тепла. Это подтверждается в данном исследовании.

Ключевые слова: турбулентность, вихревые потоки, потенциальный вихрь, обрушение волн Россби.

INVESTIGATION OF FEATURES EDDY MOMENTUM AND HEAT FLUXES IN THE REGION OF JET STREAMS

V.N. Krupchatnikov^{1,2,4}, A.V. Gochakov², O.Yu. Antokhina³

¹*Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk*

²*Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute, Novosibirsk*

³*V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk*

⁴*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow*

The eddy fluxes in the general circulation are often treating as turbulence, where eddies act to diffuse certain quasi conservative quantities, such as potential vorticity (PV), along isentropic surfaces in the free atmosphere.

The eddy fluxes are determined primarily by the eddy diffusivities and are down-gradient of the basic state PV field. Support for the turbulence approach stems from the fact that the eddy fluxes of PV in the free atmosphere are generally down-gradient in the long-term mean. In this article, we will discuss some results of the study of Rossby wave breaking processes in the region of a subtropical jet stream [1]. Many large-scale dynamic phenomena in the Earth's atmosphere are associated with the processes of propagation and breaking of Rossby waves [2–6]. Here we call attention to region of upgradient eddy PV fluxes in region of the jet in North Hemisphere associated with the overturning of Rossby waves. In some cases, the PV flow to the north turns out to be counter-gradient, and such flows result from non-linear wave breaking [7]. Also, it was noted in a number of studies that the Rossby wave breaking is one of the most important mechanisms for the interaction of the stratosphere and troposphere (for example, in [12]). The eddy momentum flux convergence and divergence near the tropopause correspond to northward and southward fluxes of PV. The northward PV flux is upgradient, and such fluxes have been arising from nonlinear wave breaking. However, one may intuitively expect that a baroclinic consumption of eddy kinetic energy is generally accompanied by an up-gradient eddy heat transport. These statements are proven to be true in our study.

Key words: *turbulence, eddy fluxes, potential vorticity, Rossby wave breaking.*

Введение

Одной из наиболее ярких особенностей зонального среднего течения в атмосфере (рис. 1) является струя в верхней тропосфере, это локальный максимум зонального ветра. Два разных процесса могут быть ответственны за создание струй в атмосфере: один – это адвекция планетарного углового момента средней меридиональной циркуляцией (СМЦ), а другой – конвергенция вихревого потока импульса.

Поскольку СМЦ в тропиках вызывается в основном тепловыми процессами, для описания струи, создаваемой СМЦ, использовался термин

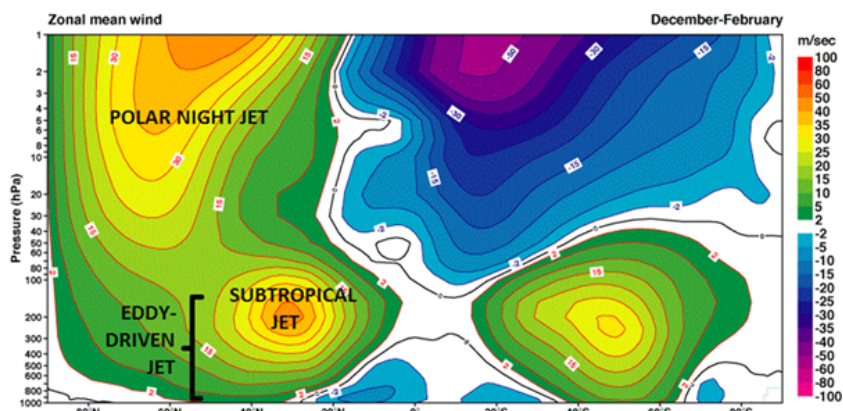


Рис. 1. Средний зональный ветер зим с 1957 по 2002 г., адаптировано из ERA-40 Atlas

«термическая струя», а струи, создаваемые конвергенцией потока вихревого импульса, назывались вихревыми струями.

Струя чисто термического форсинга может существовать только в осесимметричной модели без вихрей [2]. В тропосфере такая струя располагалась бы на субтропическом краю ячейки Хэдли, а струя вихревого форсинга располагалась бы внутри ячейки Ферреля.

Субтропическая струя обусловлена термически опрокидывающей циркуляцией между тропиками и субтропиками, и она в основном расположена на широте субтропиков ($\sim 30^\circ$ с.ш.) вблизи тропопаузы, субтропическая струя расположена на краю ячейки Хэдли. Следовательно, перенос импульса, связанный с тропическими ячейками Хэдли, является ключевым процессом, ответственным за движение субтропических струйных течений.

Данные и эксперимент

Использовалась климатология и многолетняя изменчивость обрушений волн Россби (ОВР), основанная на результатах, полученных в [1]. Для данных реанализов ERA-Interim (EI) и ERA5 (E5) была проведена процедура выделения первичных обрушений по уровням ПВ от 0,3 до 9,8 PVU (единицы потенциальной завихренности – potential vorticity units) с шагом 0,5 PVU на изоэнтропической поверхности PV- θ 350 K для 12:00 ВСВ. Первичные обрушения были подвергнуты процедуре фильтрации, исходя из критериев площади и протяженности областей обрушения. Авторами рассчитана и визуализирована климатология и многолетняя изменчивость обрушений волн Россби, в частности тренды толщины контура ПВ области

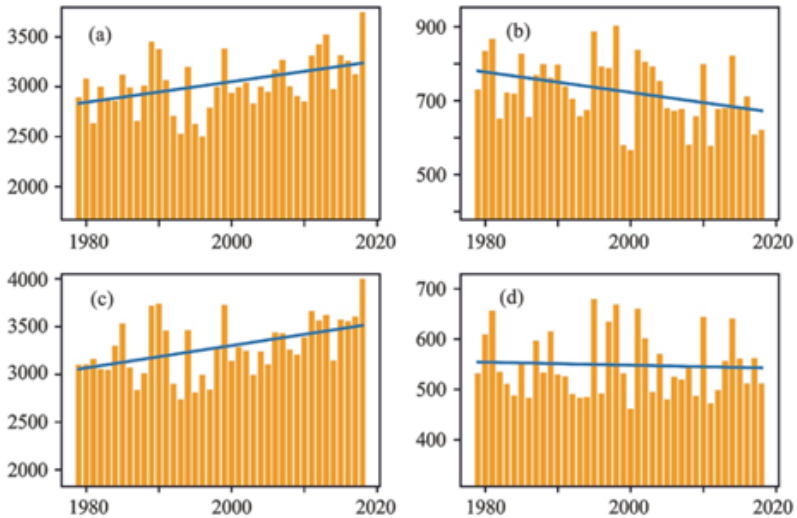


Рис. 2. Изменчивость годового числа обрушений с учетом количества дней и вовлеченных уровней обрушения (а, с) АС- и (b, d) С-типа для СП по двум реанализам: (а, b) ERA-Interim и (с, d) ERA5. (а) Тренд $Tr = 10,35$, значимость тренда $p = 0,005$; (b) $Tr = -2,76$, $p = 0,022$; (с) $Tr = 11,73$, $p = 0,003$; (d) $Tr = -0,30$, $p = 0,732$

2–6 PVU для уровня 350 К, карты повторяемости зон ОВР и диаграммы изменчивости. Характеристики представлены в месячном и сезонном, а также в среднегодовом разрешениях. Результаты доступны по адресу <https://bit.ly/3oXBjG4>.

На рис. 2 приведены годовые характеристики параметров обрушений волн Россби для всего Северного полушария (СП), учитывающие количество дней с ОВР и количество уровней ПВ, участвующих в оценке обрушений по данным реанализа [9].

Об особенностях вихревого импульса и тепловых потоков

Рассмотрим систему однородной несжимаемой жидкости:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} + f \cdot v - \frac{\partial h}{\partial x}, \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - f \cdot u - \frac{\partial h}{\partial y}, \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Система (1) допускает следствие, которое известно как уравнение баротропного вихря:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -u \frac{\partial \xi}{\partial x} - v \frac{\partial \xi}{\partial y} - \beta v, \tag{2}$$

где $\beta = \frac{df}{dy}$.

Рассмотрим зональный поток $\bar{U}(y)$, который является точным решением системы (1). Уравнение для малых возмущений вихря относительно выбранного состояния имеет вид (с точностью до членов второго порядка малости $O(\varepsilon^2)$, где ε – амплитуда возмущений)

$$\frac{\partial \xi'}{\partial t} = -\bar{U}(y) \frac{\partial \xi'}{\partial x} - v' \left(\frac{\partial \bar{\xi}}{\partial y} + \beta \right). \tag{3}$$

Умножим (3) на ξ' и усредним по x , в результате получим:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \overline{\xi'^2}}{\partial t} = -\gamma \overline{v' \xi'}, \tag{4}$$

где $\gamma = \frac{\partial}{\partial y} \left(f - \frac{\partial}{\partial y} \bar{U}(y) \right)$.

Из (4) следует, что для растущих возмущений ($\frac{\partial \overline{\xi'^2}}{\partial t} > 0$) поток вихря направлен по градиенту абсолютного вихря основного состояния, а для затухающих – против градиента абсолютного вихря основного состояния.

Немного теории из [10, 11]. Для начала нам нужно понять, что потоки импульса и завихренности просто связаны. Для бездивергентного потока (без учета сферической геометрии) имеем (с учетом форсинга и диссипации):

$$\frac{\partial \zeta'}{\partial t} = -\bar{u} \frac{\partial \zeta'}{\partial x} - \gamma v' + S' - D' \quad \text{и} \quad \overline{v' \zeta'} = -\frac{\partial (\overline{u' v'})}{\partial y}.$$

Следовательно,

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = -\frac{\partial (\overline{u' v'})}{\partial y}, \quad \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = \overline{v' \zeta'} \quad \text{и} \quad \frac{\partial P}{\partial t} = -\overline{v' \xi'} + \frac{S' \xi'}{\gamma} - \frac{D' \xi'}{\gamma}.$$

Откуда следует (без учета форсинга и диссипации):

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial t}, \quad \text{где} \quad P = \frac{1}{2\gamma} \overline{\xi'^2}.$$

Вихревая энергия не сохраняется в линейной модели, волна может обмениваться энергией со средним потоком. Из уравнения $\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = -\frac{\partial(\overline{u'v'})}{\partial y}$, умножая на \bar{u} , интегрируя по y , получим уравнение

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \frac{1}{2} \bar{u}^2 dy = \int \overline{u'v'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}.$$

Поскольку кинетическая энергия потока должна сохраняться, изменения зональной кинетической энергии должны компенсироваться изменениями энергии вихрей

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \frac{1}{2} (\overline{u'^2 + v'^2}) dy = - \int \overline{u'v'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}.$$

Глобально проинтегрированная кинетическая энергия вихрей затухает по мере того, как вихри распространяются из областей с большим зональным потоком в области с более слабым потоком, создавая **противоградиентный поток импульса** [10].

Вихревые потоки потенциального вихря и тепла вблизи субтропических струйных течений

Вихревые потоки потенциального вихря

Диффузионная роль вихрей в общей циркуляции приводит к градиентным потокам ПВ вида (например, [8]):

$$\overline{v'q'} = -D \frac{\partial \bar{q}}{\partial y}.$$

Меридиональный вихревой поток ПВ формально соответствует волновому напряжению (дивергенция потока Е-Р) и действует как основной член вихревого воздействия в балансе среднезонального импульса.

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} - f_0 \bar{v}^* = \overline{v'q'} \quad (\text{в стационарном случае}) \quad f_0 \bar{v}^* = D \frac{\partial \bar{q}}{\partial y}.$$

Соотношение «поток–градиент» формально основано на уравнении для ПВ – потенциальной энстрофии (далее для простоты – энстрофии), связанном с волновой активностью.

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{\overline{q'^2}}{2} = \overline{S'q'} - \overline{v'q'} \cdot \frac{\partial \bar{q}}{\partial y} + o^3. \quad (5)$$

Пренебрежение нелинейными членами более высокого порядка приводит, в стационарном случае, к простому балансу

$$\overline{S'q'} = \overline{v'q'} \cdot \frac{\partial \bar{q}}{\partial y}.$$

Для диссипативных процессов, точнее, процессов с диссипирующей энтропией (например, $S' \approx -\varepsilon q'$, с обратной скоростью затухания $\varepsilon > 0$) в стационарном состоянии [13]:

$$\overline{\varepsilon q'^2} = -\overline{v'q'} \cdot \frac{\partial \bar{q}}{\partial y}.$$

Учитывая, что левая часть всегда положительна, вихревой поток ПВ должен быть градиентным (обратного знака по отношению к фоновому градиенту ПВ), чтобы это соотношение сохранялось, что придает достоверность диффузионной картине вихревых потоков ПВ. Согласно уравнению (5), градиентные вихревые потоки ПВ соответствуют росту вихрей, а затухание вихрей может временно создавать противоградиентные вихревые потоки ПВ (например, [8, 11]).

Для обратимого роста и затухания противоградиентные вихревые потоки ПВ точно компенсируют градиентные потоки, что приводит к нулевому суммарному вихревому потоку ПВ. Однако если речь идет об обрушении волны, противоградиентные вихревые потоки ПВ во время затухания волны будут меньше по величине, чем градиентные вихревые потоки ПВ во время роста волны, что приводит в результате к градиентным вихревым потокам ПВ.

На рис. 3 показан сезонный цикл как функция широты на изоэнтропической поверхности 350 К, тенденции энтропии за счет вихревых потоков ПВ (отрицательные/положительные значения (синяя/красная заливка) от-

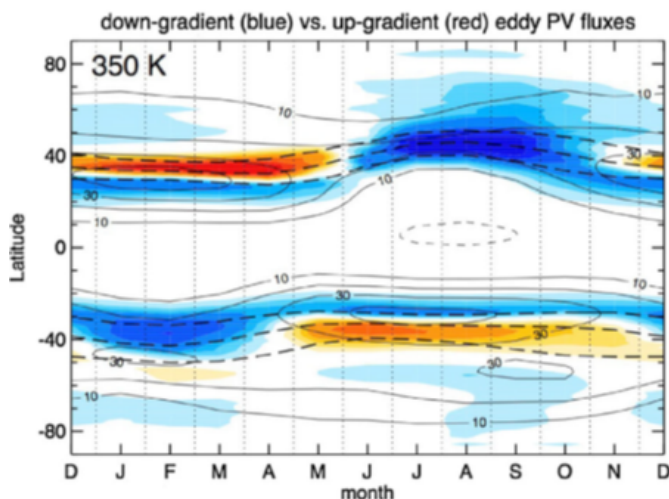


Рис. 3. Сезонный цикл как функция широты на изоэнтропической поверхности 350 К энтропии, обусловленной вихревыми потоками ПВ [8]

мечают градиентные/противоградиентные вихревые потоки ПВ и, следовательно, положительные/отрицательные тенденции энстрофии, из [8].

Вихревые потоки тепла

В некоторых исследованиях (например, [16, 17]) показано, что противоградиентный перенос тепла крупномасштабными вихрями является общей чертой всей нижней стратосферы. Это, безусловно, приводит нас к мысли, что противоградиентный перенос тепла может быть основным фактором в поддержании положительного меридионального градиента температуры в нижней стратосфере, поскольку он предполагает конвергенцию тепла в высоких широтах и дивергенцию тепла в низких широтах, если тепловые потоки не пересекают экватор. Тогда возникает вопрос: почему крупномасштабные атмосферные движения организованы так, что горизонтальный вихревой перенос тепла в среднем противоградиентный в нижней стратосфере и верхней тропосфере, но градиентный нисходящий в тропосфере?

Стационарное уравнение вихревой потенциальной энергии (ВПЭ) [14] связывает поток тепла через средний температурный градиент $(\overline{\vec{v}'T'}) \cdot \nabla \overline{T}$, скорость преобразования ВПЭ в кинетическую энергию вихря $\left(\overline{w'T'} \frac{\partial \overline{T}}{\partial z} \right)$ и адвекцию ВПЭ $\left(\overline{\vec{v}} \cdot \nabla \cdot \frac{\overline{T'^2}}{2} \right)$. Если пренебречь источниками и диссипацией тепла и малой адвекцией ВПЭ вихревой скоростью, то можно записать

$$\overline{\vec{v}} \cdot \nabla \cdot \frac{\overline{T'^2}}{2} + \overline{\vec{v}'T'} \cdot \nabla \overline{T} + \overline{w'T'} \frac{\partial \overline{T}}{\partial z} \approx 0,$$

где \vec{v} – горизонтальная скорость, w – вертикальная скорость, T – температура; верхняя черта представляет среднее время по сравнению со временем жизни вихря, штрих – отклонение от среднего. В области бароклинных неустойчивых вихрей потеря ВПЭ за счет преобразования в кинетическую энергию вихрей $\overline{w'T'} \frac{\partial \overline{T}}{\partial z} > 0$ и ее перенос вниз по течению $\overline{\vec{v}} \cdot \nabla \cdot \frac{\overline{T'^2}}{2} > 0$ уравновешиваются градиентным переносом тепла $\overline{\vec{v}'T'} \cdot \nabla \overline{T} < 0$. В областях затухания вихрей, с малым или отрицательным значением $\overline{w'T'} \frac{\partial \overline{T}}{\partial z}$, пространственное затухание вихрей $\overline{\vec{v}} \cdot \nabla \cdot \frac{\overline{T'^2}}{2} < 0$ часто приводит к противоградиентному переносу тепла $\overline{\vec{v}'T'} \cdot \nabla \overline{T} > 0$.

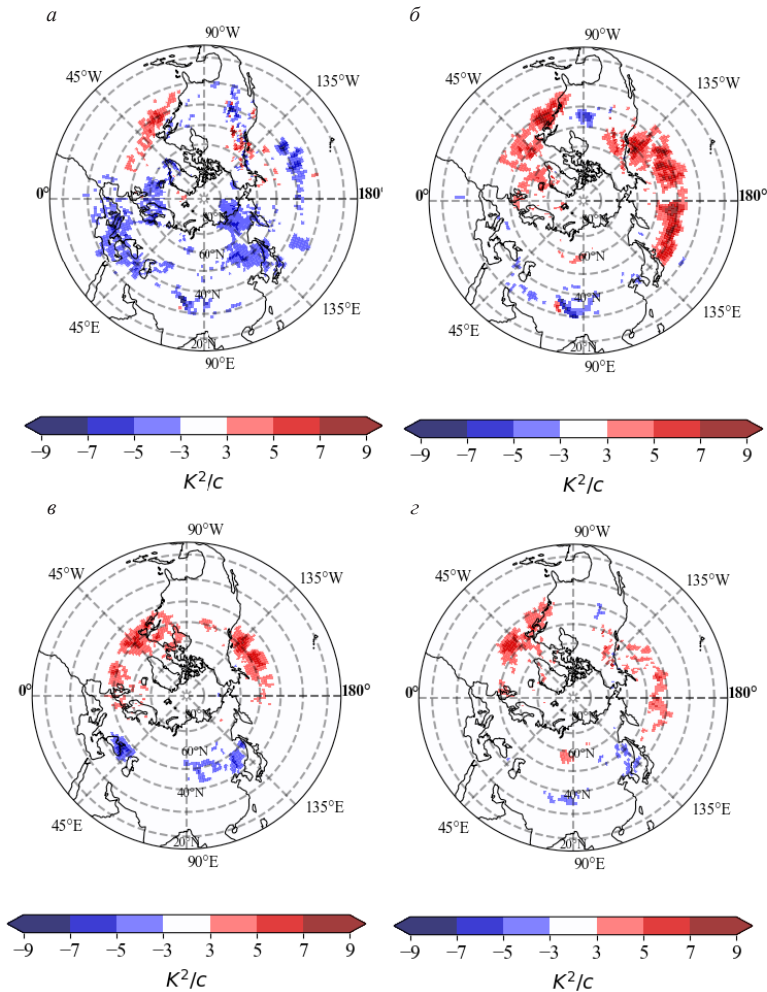


Рис. 4. Градиентные и прогнвоградиентные вихревые потоки тепла по данным реанализа ERA5 для сезонов: зима (*a*), весна (*б*), лето (*в*) и осень (*г*)

На рис. 4 представлены результаты вычисления градиентных и прогнвоградиентных вихревых потоков тепла на поверхности 200 гПа на основе данных реанализа ERA5 для всех сезонов.

Для выявления долговременной изменчивости вихревых потоков тепла за каждый день летнего (JJA) и зимнего (DJF) периодов были отдельно просуммированы положительные (градиентные) и отрицательные (прогнвоградиентные) потоки в каждом узле сетки для всех долгот от 0 до

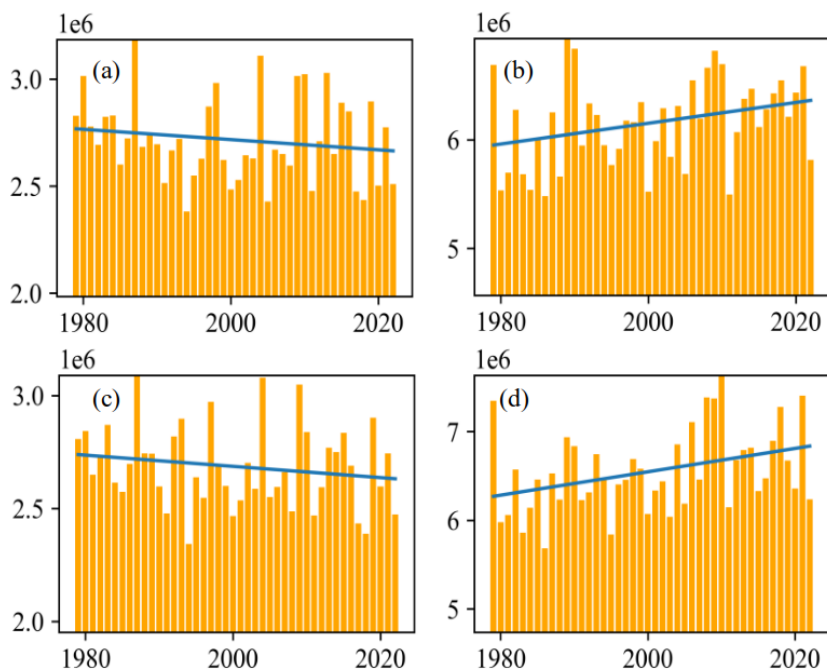


Рис. 5. Изменчивость суммарного вихревого потока тепла в области 20–50° с.ш. для летнего (а, с) и зимнего (b, d) периодов для положительных (а, b) и отрицательных значений (с, d). (а) Тренд $Tr = -2395$, значимость тренда $p = 0,312$; (b) $Tr = 9561$, $p = 0,043$; (с) $Tr = 2488$, $p = 0,251$; (d) $Tr = 13\,160$, $p = 0,015$

360 для субтропической зоны (20–50° с.ш.). На рис. 5 видно, что для зимнего периода и для положительных, и для отрицательных потоков присутствует значимый положительный тренд, тогда как для летнего периода – отрицательный тренд, однако его значимость не высока (70 и 80 % для положительных и отрицательных потоков соответственно). Результаты, полученные для зимнего периода, согласуются с положительным трендом в количестве антициклонических опрокидываний (см. рис. 2), а результаты для летнего периода в большей степени схожи с результатами для циклонического типа (см. рис. 2), для которых тренд либо отсутствует, либо является отрицательным.

Заключение

На основе метода идентификации и кластеризации событий обрушения волн Россби, представленного в [1], исследуются климатология и из-

менчивость антициклонического (типа АС) и циклонического (типа С) обрушений в субтропической области струйных течений.

- Интенсивность обрушений типа АС для всего Северного полушария хорошо согласуется для двух наборов данных и демонстрирует значительный положительный тренд. Это соответствует данным, полученным в [12], но тенденция, обнаруженная в настоящем исследовании, более выражена. Согласно двум реанализам, циклонические ОВР менее последовательны, и только ERA-Interim показывает значительный компонент отрицательно-го тренда.

- Для атмосферы со слоистой структурой, особенно для одного слоя, такого как нижняя стратосфера и верхняя тропосфера, аналитический подход невозможен из-за сложности проблемы. Однако можно интуитивно ожидать, что бароклинное потребление вихревой кинетической энергии обычно сопровождается противогradientным вихревым переносом тепла. Эти утверждения подтверждаются в нашем исследовании.

Литература

1. Gochakov A.V., Antokhina O.Yu., Krupchatnikov V.N., Martynova Yu.V. Long-term Variability of Rossby Wave Breaking in the Subtropical Jet Stream Area // Russian Meteorology and Hydrology. 2022. Vol. 47, No. 2. P. 79–88.
2. Held I.M., Hou A.Y. Nonlinear axially symmetric circulations in a nearly inviscid atmosphere // J. Atmos. Sci. 1980. Vol. 37. P. 515–533. DOI: 10.1175/1520-0469(1980)037<0515:NASCIA>2.0.CO;2.
3. Barnes E.A., Hartmann D.L. Detection of Rossby wave breaking and its response to shifts of the midlatitude jet with climate change // J Geophys Res Atm. 2012. Vol. 117, No. D9. DOI: 10.1029/2012JD017469.
4. Krupchatnikov V.N., Borovko I.V. Rossby wave breaking and blocking events associated with some atmospheric circulation regimes in the Northern Hemisphere based on a climate system model (PlaSim-ICMMG-1.0) // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. Vol. 611. P. 012015. DOI: 10.1088/1755-1315/611/1/012015.
5. Lupo A., Jensen A., Mokhov I., Timazhev A., Eichler T., Efe B. Changes in Global Blocking Character in Recent Decades // Atmosphere. 2019. Vol. 10, No. 2. P. 92. DOI: 10.3390/atmos10020092.
6. Maher P., Kelleher M.E., Sansom P.G., Mettven J. Is the subtropical jet shifting poleward? // Climate Dynamics. 2019. Vol. 54, No. 3–4. P. 1741–1759.
7. McIntyre M.E., Palmer T.N. Breaking planetary waves in the stratosphere // Nature. 1983. Vol. 305. P. 593–600.
8. Birner T., Thompson D.W., Shepherd T.G. Up-gradient eddy fluxes of potential vorticity near the subtropical jet // Geophys Res Lett. 2013. Vol. 40. P. 5988–5993.
9. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J. et al. The ERA5 global reanalysis // Quart J Royal Meteorol Soc. 2020. Vol. 146. P. 1999–2049. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.

10. *Salmon R., Held I.M., Fields J., Thiffeault J.L.* The General circulation of the atmosphere: 2000 program in Geophysical Fluid Dynamics. Woods Hole Oceanographic Institution. 2001. DOI: 10.1575/1912/15.
11. *Крупчатников В.Н., Курбаткин Г.П.* Моделирование крупномасштабной динамики атмосферы. Численные методы. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1991. 169 с.
12. *Jing P., Banerjee S.* Rossby wave breaking and isentropic stratosphere-troposphere exchange during 1981–2015 in the northern hemisphere // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2018. Vol. 123. P. 9011–9025.
13. *Andrews D.G.* A conservation law for small-amplitude quasi-geostrophic disturbances on a zonally asymmetric basic flow // *J. Atmos. Sci.* 1983. Vol. 40. P. 85–90.
14. *Holland W.R., Rhines P.B.* An example of eddy-induced ocean circulation // *J. Phys. Oceanogr.* 1980. Vol. 10. P. 1010–1031.
15. *White R.M.* The Counter-Gradient Flux of Sensible Heat in the Lower Stratosphere // *Tellus.* 1954. Vol. 6, No. 2. P. 177–179. DOI: 10.3402/tellusa.v6i2.8724.
16. *Peng L.* Stratospheric Wind Temperature and Isobaric Height Conditions During the IGY Period: Part II. Report No. 10, Planetary Circulation Project, Dept. of Meteor., Mass. Inst. of Tech. 1963. P. 1–208.
17. *Murakami T.* Stratospheric Wind Temperature and Isobaric Height Conditions During the IGY Period. Part I. Report No. 5, Planetary Circulation Project, Dept. of Meteor., Mass. Inst. Tech. 1962. P. 1–213.

АЭРОСИНОПТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ГРАДА НАД ЮГО-ВОСТОКОМ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

В.П. Горбатенко, Л.Г. Ананова, Х.Т. Апостолиди, А.А. Карпова

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Томск

На фоне глобального потепления климата над юго-востоком Западной Сибири участились случаи выпадения града. В работе проанализированы аэросиноптические условия образования града за 2013–2022 гг. Получено, что наибольшая повторяемость града формируется в циклонах, приходящих на исследуемую территорию с юго-запада (22 %), запада (20 %), и в циклонах местного происхождения (14 %). Чаще всего град образуется на холодных фронтах (30 %) и фронтах окклюзии (22 %). Согласно данным аэрологического зондирования, высота верхней границы конвективной облачности в дни с градом меняется в пределах 5,5–7,0 км. Максимальные значения высоты верхней границы облаков в дни с выпадением града наблюдаются в июле и достигают 12 км. Средние значения вертикальной мощности градовых облаков меняются в пределах 4,5–7,0 км.

Ключевые слова: град, синоптический анализ, индексы неустойчивости атмосферы.

AEROSYNOPTIC CONDITIONS FOR THE FORMATION OF HAIL OVER THE SOUTHEAST OF WESTERN SIBERIA

V.P. Gorbatenko, L.G. Ananova, Kh.T. Apostolidi, A.A. Karpova

Tomsk State University, Tomsk

Against the background of global warming over the south-east of Western Siberia, hail has become more frequent. The paper analyzes the aerosynoptic conditions of hail formation for the period 2013–2022. It was found that the hail is formed with highest frequency in cyclones coming to the study area from the southwest (22 %), west (20 %) and in cyclones of local origin (14 %). Most often, hail is formed on cold fronts (30 %) and occlusion fronts (22 %). According to aerological sounding data, the height of the upper limit of convective cloudiness on days with hail varies within 5.5–7.0 km. The maximum values of the height of the upper boundary of the clouds on days with hail fall are observed in July and reach 12 km. The average values of the vertical power of hail clouds vary within 4.5–7.0 km.

Key words: hail, synoptic analysis, indices of atmospheric instability.

На территории Западной Сибири тенденция потепления климата в последнее десятилетие продолжается во все сезоны, кроме зимы [1]. Атмосфера Западной Сибири в теплый период года становится все более теплой, смещаются временные границы устойчивого перехода средних суточных значений температуры воздуха, увеличивается период года, когда вероятность развития опасных конвективных явлений высока. На этом фоне чрезвычайные ситуации, обусловленные развитием глубокой мезомасштабной конвекции, в последнее десятилетие повторяются гораздо чаще, чем до 2000 г. [2]. В том числе замечено увеличение повторяемости таких опасных конвективных явлений, как гроза и град, улучшение качества прогноза которых становится все более актуальным.

Однако град – очень сложное для качественного прогноза событие, обусловленное недостатком исходной информации [3]. Недостаток информации вызван тем, что для прогнозирования града, наряду с пониманием синоптической ситуации, необходимо иметь данные радиометеорологического и аэрологического зондирования. На территории Западной Сибири аэрологическое зондирование проводится на станциях, отстоящих на большом расстоянии друг от друга, причем временной интервал между выпусками радиозонда составляет 12 часов (выпуск радиозонда осуществляется в 06 и 12 ч ВСВ) и отличается от промежутка времени с максимальным развитием конвективных процессов. Метеорологические радиолокаторы, расположенные в районе г. Новосибирска, обслуживают лишь небольшую часть территории в радиусе до 300 км, в то время как частота выпадения града увеличивается и на территориях, расположенных севернее. В качестве примера можно привести изменчивость повторяемости гроз и града на территории Томской области, расположенной в диапазоне 56–61° с.ш. и 75–89° в.д. [2, 4, 5].

В настоящее время для решения проблемы улучшения качества прогноза предлагаются глобальные модели атмосферы, которые выдают информацию, заменяющую данные фактического аэрологического зондирования [3]. Однако существует проблема при использовании этой информации, поскольку исследования взаимосвязи характеристик градовых облаков, размера града, а также площади, поврежденной градом, с параметрами атмосферы проводятся недостаточно или не проводятся совсем. При этом редкая сеть аэрологических станций Западной Сибири вряд ли обеспечит хорошие перспективы развития этой методики прогноза града, поэтому наиболее актуальными задачами видятся исследования аэросиноптических условий формирования градовых облаков над Западной Сибирью.

Целью настоящей работы является анализ синоптических процессов, которые обеспечивают формирование мощной конвективной облачности, продуцирующей град, и ряда параметров мощности развития конвекции, определяемых с помощью аэрологического зондирования атмосферы.

Информационной базой о случаях выпадения града послужили записи журнала «Шторм» с 2013 по 2022 г., предоставленные Томским центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ЦГМС). Синоптический анализ производился на базе архива АМСГ Томск, где были выбраны приземные и кольцевые карты погоды за даты, когда регистрировались случаи выпадения града над территорией Томской области.

Для выявления характеристик неустойчивости атмосферы в дни с градом за период июнь–август была использована база данных аэрологического зондирования атмосферы на станциях Новосибирск, Колпашево, Александровское. Однако для анализа характеристик состояния атмосферы было выбрано только 83 случая, поскольку аэрологические данные в дни выпадения града часто отсутствуют.

Заметим, что до эпохи глобального потепления над Томской областью наблюдалось не более чем 14–28 дней с грозой в год [2]. При этом повторяемость гроз увеличивалась с изменением географической широты от 60 до 55° с.ш., а дней с градом в этих широтах наблюдалось в среднем от 1 до 4 в год. Анализ частоты регистрации случаев града и диаметра градин за период 2015–2018 гг. представлен в работе [4]. Результаты, полученные за последние годы (табл. 1), демонстрируют как существенное увеличение числа дней с градом, отмеченных на территории Томской области, так и тот факт, что град в течение грозового сезона регистрировался в окрестности одной и той же станции по несколько раз.

Причем если в XX в. град чаще регистрировался только в южной части территории, то в 2019–2022 гг. он не единожды за год выпадал даже на станциях, расположенных близ 60° с.ш. (табл. 2). Заметим, что согласно [6, 7] среднее число дней с градом на метеорологических станциях Томской области в период до 1965 г. составляло не более одного дня в год на севере области и не более двух дней на юге. При этом наибольшее число дней с градом за весь период наблюдения не превышало трех случаев выпадения на севере области и шести на юге.

Таблица 1

Отношение числа дней с градом (n) на метеостанциях Томской области к числу станций (N), регистрировавших град

Год	Среднее за периоды, гг. [6, 7]		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
	1891–1965	1966–1985										
n/N	3/3	5/4	8/6	4/5	7/6	10/9	12/9	6/5	11/8	24/15	18/13	16/12

Таблица 2

**Примеры увеличения временной и пространственной локализации
выпадения града в 2020 г.**

Метеостанция	Географические координаты		Время выпадения града, ч, ВСВ	Продолжи- тельность, мин
	широта, с.ш.	долгота, в.д.		
15.05.2020 г.				
Майск	57,8	77,2	13:27	1
Напас	59,9	82,0	13:29	1
19.06.2020 г.				
Александровское	60,5	77,8	5:45	3
Александровское			6:54	2
20.07.2020 г.				
Белый Яр	58,5	85,1	4:50	15
Степановка	58,7	86,8	7:45	5
Колпашево	58,3	83,9	8:58	2

За период 1966–1985 гг. случаев выпадения града регистрировалось немного больше (на 1–2 события), а причиной тому было, по-видимому, улучшение методики наблюдений. При этом число метеорологических станций на территории Томской области, согласно справочникам, в 60-е годы XX в. составляло 27–28, а в исследуемый в настоящей работе период повторяемости града их 23, т. е. на увеличение числа дней с зарегистрированным градом не повлияла плотность визуальных наблюдений.

Очевидно, что и число станций, регистрирующих град, и число событий в последние годы увеличилось в 3–5 раз. Причем возросло не только число дней с градом за счет увеличения продолжительности теплого периода года [8]. Есть основания предполагать, что стали больше и размеры площади конвективных облаков, генерирующих град, и продолжительность их жизни. Доказательством тому является, например, тот факт, что метеорологические станции (Майск и Напас) 15.05.2020 г. регистрировали град практически одновременно, хотя и расположены на расстоянии более 200 км (см. табл. 2).

Сопоставление времени регистрации града позволяет предполагать, что он является продуктом одного и того же комплекса конвективных ячеек. На широте 60,5° с.ш. (станция Александровское) град 19.06.2020 г. выпадал дважды с интервалом около часа, немного превышающим время жизни стандартной конвективной ячейки. Следовательно, можно предположить, что физические характеристики конвективных комплексов, обуславливающих формирование града в этот день, намного превосходили свойственные этому региону ранее. Значит, облачные системы, формиру-

ющие град над Западной Сибирью, в последние годы становятся все более обширными в пространстве, а мощных конвективных ячеек, продуцирующих продолжительное выпадение града, стало больше в одном комплексе конвективных ячеек и формируются они значительно чаще.

Увеличение повторяемости опасных конвективных явлений может быть обусловлено двумя причинами: повторяемостью синоптических процессов, обеспечивающих выход на исследуемую территорию теплых и влажных воздушных масс, и увеличением неустойчивости атмосферы на фоне изменившихся условий прогрева и увлажнения подстилающей поверхности. При наличии на исследуемой территории практически неограниченных источников местной влаги в виде болотных комплексов, неустойчивость атмосферы на фоне потепления, несомненно, увеличивается.

Поэтому есть основания предполагать наличие изменений термодинамических характеристик всей толщи тропосферы, приводящих к усилению турбулентных потоков и повторяемости опасных конвективных явлений. Суточный ход повторяемости выпадения града (рис. 1) ярко демонстрирует роль конвективной неустойчивости атмосферы в формировании мощной облачности, поскольку более 50 % всех случаев выпадения града приходится на период 14–17 ч местного времени, с ярко выраженным максимумом в 15 ч, и более 80 % – на период 13–19 ч.

Для каждого случая выпадения града анализировались синоптические карты, по которым определялся тип и генезис барических образований, во время господства которых выпадал град.

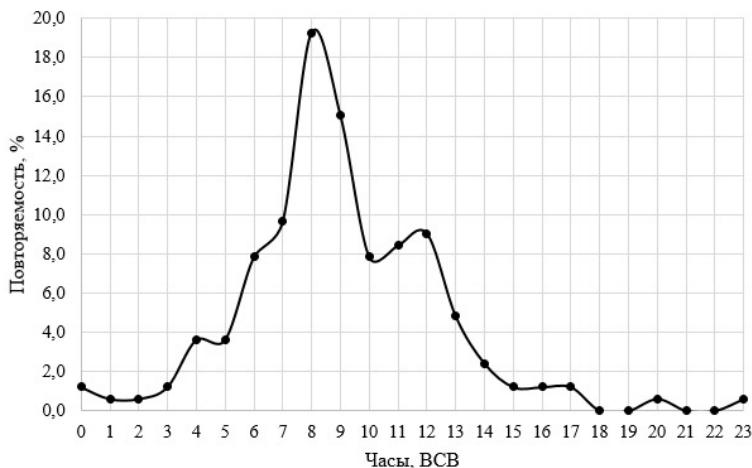


Рис. 1. Суточный ход повторяемости выпадения града на юго-востоке Западной Сибири за 2013–2022 гг.

Для более детального изучения синоптических условий и возникновения опасных явлений, в частности града, в каждом типе барических образований в исследовании использовалась классификация [9]. В данной методике барические образования подразделяются на несколько типов по месту зарождения и траектории движения.

В соответствии с данной классификацией выделяются барические образования, приходящие на территорию Западной Сибири и влияющие на погодные условия, такие как:

I – западные циклоны, перемещающиеся из центральных районов Европейской России к Восточно-Сибирскому плоскогорью вдоль 60–65° с.ш.

II – западные циклоны, образующиеся на волне полярного фронта в районе Екатеринбурга, Омска, Самары.

III – юго-западные циклоны, приходящие из районов Каспийского и Аральского морей и смещающиеся на северо-восток.

IV – северные циклоны, образующиеся в Карском море и северных районах Западной Сибири, смещаются на юго-юго-восток.

V – южные циклоны, приходящие из районов Ашхабада, Ташкента или из междуречья Амударьи и Сырдарьи, смещаются на северо-восток.

VI – местные циклоны, образующиеся непосредственно на территории Западной Сибири: на южной части или в районе междуречья Обь–Иртыш. Ведут себя достаточно статично и имеют минимальные вектора смещения, из которых нет возможности выделить преобладающий.

VII – северные циклоны, которые приходят из районов Кольского полуострова, Баренцева моря или севера европейской территории России, смещаются на юго-восток в направлении Омска.

C VIII по XII – типы антициклонов, пришедших на территорию Западной Сибири и образывавшихся над ней.

Для выявления региональных особенностей возникновения града на юго-востоке Западной Сибири по кольцевым картам погоды определялся тип барического образования, при котором возникал град. За один случай принималось выпадение града на одной станции. Для синоптического анализа было рассмотрено 127 случаев.

Каждый случай с градом за период с 2013 по 2022 г. классифицировался по месяцу и типу барического образования, в котором наблюдался (табл. 3):

1. Циклон (с I по VII тип).
2. Антициклон (с VIII по XII тип).
3. Седловина.
4. Малоградиентное поле.

Анализ синоптических условий при выпадении града на юго-востоке Западной Сибири показал, что абсолютное большинство случаев с выпа-

Таблица 3

**Повторяемость (%) града в различных типах барических образований
на юго-востоке Западной Сибири с 2013 по 2022 г.**

Типы барических образований	Месяцы							Всего за сезон
	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	
I	3,9	3,9	3,9	3,9	2,4	2,4	–	20,4
II	–	3,1	2,4	1,6	3,1	–	–	10,2
III	1,6	4,7	6,3	6,2	2,4	0,8	–	22,0
IV	–	3,9	1,6	–	0,8	–	–	6,3
V	–	–	3,1	2,4	0,8	–	–	6,3
VI	–	–	1,6	7,9	1,6	2,4	0,8	14,3
VII	–	3,9	3,1	–	–	–	–	7,0
Антициклоны (VIII–XII)	–	1,6	–	0,8	3,1	2,4	–	7,9
Седловина	–	–	–	0,8	1,6	1,6	–	4,0
Малогradientное поле	–	–	–	0,8	0,8	–	–	1,6
Всего	5,6	21,3	22,0	24,4	16,5	9,4	0,8	100

дением града (86,5 %) в данном районе возникает в циклонах, как и следовало ожидать.

Заметим, что сезон грозовой активности над исследуемым регионом начинается во второй половине апреля, а заканчивается в октябре, но в сумме за эти два месяца плотность разрядов молний не превышает 1 % [5], однако случаев выпадения града на эти месяцы приходится 6,5 %.

Большое число майских случаев выпадения града на исследуемой территории приходится на 2020 г.: град регистрировался 5 станциями, расположенными в разных частях территории, в течение 3 дней (6, 15 и 26 мая). Заметим, что весна 2020 г. на исследуемой территории наступила раньше срока и характеризовалась очень высокими значениями температуры воздуха, причем самыми теплыми за историю наблюдений были и апрель, и май [10]. Прогрев подстилающей поверхности и высокое влагосодержание атмосферы обеспечили усиление конвективного потенциала атмосферы в пришедших с северной части ЕТР циклонах и формирование градовой облачности. Замеченной особенностью формирования градовых облаков в этот год в мае было наличие высоких контрастов температуры приземного слоя атмосферы в зоне фронтов: 8–12 °С/1000 км.

Наибольший процент повторяемости града наблюдался в июле в местных циклонах (VI тип) – 7,9 %, а также чуть меньше в июне в юго-западных циклонах (III тип) – 6,3 %. Июль стал месяцем с самой высокой градовой деятельностью – 24,4 %. Вторым месяцем с активным выпадением града стал июнь – 22,0 %, в котором преобладают юго-западные циклоны

(III тип). Замечено, что в мае повторяемость циклонов всех типов примерно одинакова и составляет 3–5 %, кроме южных (V) и местных (VI) циклонов, которые в этом месяце не отмечались. Май характеризуется высокой циклонической активностью, поэтому и повторяемость града в мае почти такая же, как в июне и июле.

В общую сумму повторяемости града за период с апреля по октябрь наибольший вклад вносят юго-западные циклоны (III тип) – 22,0 %, западные циклоны (I тип) – 20,4 % и местные циклоны (VI тип) – 14,3 %.

За анализируемый период исследования основная часть циклонов, в которых отмечалось выпадение града (61,6 %), имела давление от 991 до 1000 гПа.

В антициклональных условиях град наблюдался достаточно редко и в основном на восточной периферии. Всего в антициклонах отмечалось 7,9 % всех случаев с градом. Минимальная повторяемость выпадения града отмечалась в седловине – 4,0 % и малоградиентном поле – 1,6 %.

При анализе синоптических карт было замечено, что местные циклоны (VI) могут достаточно долго находиться на территории Западной Сибири, так как не имеют определенного вектора смещения, а также именно этот тип очень часто регенерировал и увеличивал время своего существования на данной территории. Юго-западные циклоны (III), несмотря на то, что имели вектор смещения и редко регенерировали над рассматриваемым районом, чаще остальных приходили на юго-восток Западной Сибири, и, соответственно, конвективная деятельность чаще развивалась именно в данном типе барических образований.

По условиям возникновения град можно разделить на фронтальный и внутримассовый. Все случаи с градом за период с 2013 по 2022 г. классифицировались не только по типу барического образования, но также и по наблюдению в зоне фронта (с выделением типа) или во внутримассовых условиях (табл. 4).

Таблица 4

Повторяемость (%) фронтального и внутримассового града на юго-востоке Западной Сибири с 2013 по 2022 г.

Тип фронта	Месяц							Всего за сезон
	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	
Холодный	1,6	3,9	5,5	7,9	6,3	3,9	0,8	29,9
Теплый	2,4	6,3	2,4	3,9	3,1	–	–	18,1
Окклюзия	1,6	3,1	6,3	5,5	4,7	0,8	–	22,0
Вторичный	–	4,0	4,7	1,6	1,6	3,1	–	15,0
Внутримассовый град	–	4,0	3,1	5,5	0,8	1,6	–	15,0
Всего	5,6	21,3	22,0	24,4	16,5	9,4	0,8	100

За период исследования максимальные значения повторяемости града отмечались на холодных фронтах и фронтах окклюзии – 30 и 22 % соответственно, повторяемость града на теплых фронтах несколько ниже и составляет 18 %. Во внутримассовых условиях град формируется в 15 % случаев, такую же повторяемость имеет град на вторичных холодных фронтах.

Такое распределение было весьма ожидаемо, так как чаще всего условия для градовой деятельности формируются на холодных фронтах и фронтах окклюзии. Это связано с особенностями возникновения характерных типов облачности для данных фронтов и скоростью их перемещения.

Наибольший процент выпадения града наблюдался на холодных фронтах в июле – 7,9 %, на теплых фронтах в мае и на фронтах окклюзии в июне – по 6,3 %.

Подробный анализ синоптических условий в дни выпадения града на юго-востоке Западной Сибири показал, что внутримассовая конвективная облачность, образующаяся над Западной Сибирью, продуцирует более 15 % случаев выпадения града. Наблюдались ли такие случаи до периода глобального потепления, установить пока не удалось. Заметим, что град, сформировавшийся во внутримассовой облачности, регистрировался только в мае, июне и июле при высокой температуре воздуха у поверхности земли: $22 \leq T \leq 31$ °C.

Поскольку на фоне меняющегося климата град над территорией Западной Сибири стал регистрироваться чаще, актуально сравнить степень развития конвекции в атмосфере в период, когда град стал выпадать чаще, с результатами предыдущих исследований.

В качестве характеристик конвекции используются термодинамические параметры атмосферы – индексы неустойчивости, которые разработаны на основе температурно-влажностных профилей, полученных по данным аэрологических наблюдений. Посредством индексов неустойчивости представляется возможным качественно и количественно оценивать степень устойчивости атмосферы, а зная их пороговые значения – прогнозировать развитие грозы и опасных конвективных явлений погоды. К достоинству индексов неустойчивости атмосферы относится универсальность, так как они позволяют сравнивать параметры конвекции в разных по физико-географическим характеристикам регионах мира и изучать динамику и эволюцию погодных явлений, связанных с конвекцией.

Для исследования были выбраны такие индексы, как: K-index, Totals, CAPE, CINS, EQLV, LFCT [12]. Индексы выписывались по данным аэрологического зондирования атмосферы на станциях Александровское, Колпашево, Новосибирск и Барабинск за сроки 00 и 12 ВСВ [13] в зависимости от взаимного расположения пункта зондирования и метеостанции,

отмечавшей град, а также срока, ближайшего к моменту выпадения града. Были рассмотрены только случаи с выпадением града в летние месяцы, так как в переходные сезоны в журнале «Шторм» могла отмечаться крупа вместо града. За период исследования июнь–август получилось отобрать 83 случая. В табл. 5 приведены значения индексов неустойчивости и значения давления атмосферы (гПа) на высоте нижней (LFCT) и верхней (EQLV) границ конвективной облачности в дни выпадения града за период 2013–2022 гг. Разница высоты верхней и нижней границ конвективной облачности позволила определить мощность конвективно-неустойчивого слоя (КНС) облачности при возникновении града. Получено, что толщина КНС в дни с градом превышает 4 км, увеличиваясь к югу, и в июле может превышать 7 км. Необходимо помнить, что высота верхней границы КНС может превышать вышеуказанные значения, поскольку аэрологическое зондирование атмосферы в сроки максимального развития конвекции в исследуемом регионе не производится.

Выявить особенности характеристик конвекции, включая индексы, характеризующие верхнюю и нижнюю границы градовой облачности в период с 2020 по 2022 г. в дни, когда град регистрировался чаще, чем в

Таблица 5

**Значения индексов неустойчивости атмосферы,
высота верхней и нижней границы облачности в дни с градом**

Месяц	Значение	Индексы неустойчивости атмосферы				
		K-index, °C	Totals, °C	CAPE, Дж/кг	EQLV, гПа	LFCT, гПа
Июнь	Среднее	22	46	170	516	803
	Максимум	36	54	962	829	912
	Минимум	8	35	0,2	215	673
Июль	Среднее	26	47	471	394	782
	Максимум	42	58	3112	736	897
	Минимум	5	29	5	189	658
Август	Среднее	26	48	457	433	765
	Максимум	35	54	2953	719	864
	Минимум	3	38	0,3	191	498
Всего	Среднее	25	47	347	459	786
	Максимум	42	59	3112	830	912
	Минимум	3	29	0,2	189	498
	σ	7,7	4,9	637,3	184,5	77,2

Примечание. σ – среднеквадратическое отклонение.

предыдущие годы, не удалось. Средние значения индексов неустойчивости даже в годы с максимально развитой конвективной облачностью не выходят за пороговые значения, опубликованные в [2, 12]. Следовательно, полученные значения индексов можно использовать для прогноза града, особенно если эти значения рассчитываются по базам спутникового зондирования атмосферы, позволяющим определить пространственную локализацию градовой облачности, а также скорость и направление ее перемещения. Например, детализированное пространственное положение очагов высокой степени неустойчивости атмосферы и их динамику можно отслеживать с помощью спектрорадиометра MODIS (MODerate resolution Imaging Spectro-radiometer), установленного на космических платформах EOS AM-1 (Terra) и EOS PM-1 (Aqua).

В результате проведенных исследований получено:

1. Число случаев выпадения града в умеренных широтах Западной Сибири в последние годы увеличилось в 3–5 раз.

2. Конвективные облачные системы, в которых образуется град, становятся все более обширными в пространстве, а мощные конвективные ячейки, продуцирующие продолжительное выпадение града, стали формироваться значительно чаще.

3. Максимальная повторяемость выпадения града приходится на 15 ч местного времени.

4. Наибольшую повторяемость случаев выпадения града обеспечивает выход на исследуемую территорию циклонов с юго-западных (22 %) и западных (20 %) направлений.

5. Значительную долю случаев выпадения града (14 %) обеспечивают циклоны, сформировавшиеся над территорией Западной Сибири и стационарирующие над ней.

6. Максимальные значения повторяемости града отмечались на холодных фронтах и фронтах окклюзии – 30 и 22 % соответственно. До 15 % случаев град над Западной Сибирью формируется при внутримассовых условиях.

7. Исследование данных аэрологического зондирования атмосферы в дни с градом показало, что значения индексов неустойчивости атмосферы в период максимальной повторяемости града (2020–2022 гг.) не выходят за пороговые значения, определенные для Западной Сибири. Мощность конвективной облачности при возникновении града также не отличается от результатов, полученных ранее.

8. Максимальные значения высоты верхней границы облаков в дни с выпадением града наблюдаются в июле и составляют примерно 12 км. Средние значения высоты конвективной облачности для июня и августа составляют примерно 5–7 км.

Литература

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1008 с.
2. Горбатенко В.П., Кузевская И.В., Пустовалов К.Н., Чурсин В.В., Константинова Д.А. Оценка изменчивости конвективного потенциала атмосферы в условиях изменяющегося климата Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 108–117.
3. Кагермазов А.Х., Созаева Л.Т. Прогноз града и оценка его размера на основе глобальной математической модели атмосферы // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2022. № S685. С. 133–140.
4. Горбатенко В.П., Пустовалов К.Н., Громова А.В., Нагорский П.М. Опасные конвективные явления над Западной Сибирью в XXI веке // Доклады Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы: доклады конференции (Нальчик, 8–10 сентября 2021 г.). Нальчик: Изд-во «Принт Центр», 2021. С. 455–460.
5. Нечепуренко О.Е., Горбатенко В.П., Пустовалов К.Н., Громова А.В. Грозовая активность над Западной Сибирью // Геосферные исследования. 2022. № 4. С. 123–134. DOI: 10.17223/25421379/25/8.
6. Справочник по климату СССР. Вып. 20. Ч. V. Облачность и атмосферные явления. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 323 с.
7. Справочник по климату СССР. Вып. 20. Метеорологические данные за отдельные годы. Ч. VIII. Атмосферные явления. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 491 с.
8. Горбатенко В.П., Волкова М.А., Носырева О.В., Кузевская И.В. Современные тенденции климатических характеристик, влияющих на развитие транспортной системы Томской области // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7, № 4. С. 71–95. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-4-71-95.
9. 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.
10. Изменение климата. Информационный бюллетень. [Электронный ресурс]. URL: https://ecology.gpntb.ru/uploads/file/Materials/Izmenenie_klimata_N88_DecJan_202.pdf (дата обращения: 20.06.2023).
11. Горбатенко В.П., Тунаев Е.Л., Пустовалов К.Н., Волкова М.А., Нечепуренко О.Е. Изменения циклогенеза над западной Сибирью в 1976–2017 гг. // Фундаментальная и прикладная климатология. 2020. С. 35–57.
12. Нечепуренко О.Е., Горбатенко В.П., Константинова Д.А., Севастьянов В.В. Индексы неустойчивости атмосферы и их пороговые значения, оптимальные для прогноза гроз над Сибирью // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2 (368). С. 44–59.
13. Atmospheric Soundings // University of Wyoming College of Engineering. [Электронный ресурс]. URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (дата обращения: 20.06.2023).

СИНОПТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ГРОЗ НАД ЮГО-ВОСТОКОМ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Л.Г. Ананова, А.А. Карпова, Х.Т. Апостолиди

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Томск

На фоне меняющегося климата над Западной Сибирью замечено увеличение продолжительности грозового сезона и числа дней с грозой. Это происходит на фоне учатившегося формирования мезомасштабных конвективных комплексов разного генезиса. Есть основания предполагать, что над Западной Сибирью на фоне потепления климата изменилось соотношение повторяемости фронтальных и внутримассовых гроз. В данной работе проанализированы синоптические условия возникновения гроз над территорией юго-востока Западной Сибири за 2020–2022 гг. и проведено сравнение с аналогичными исследованиями более раннего периода.

Ключевые слова: гроза, синоптические условия, фронтальные грозы, внутримассовые грозы, барические образования.

SYNOPTIC CONDITIONS FOR THE FORMATION OF THUNDERSTORMS OVER THE SOUTHEAST OF WESTERN SIBERIA

L.G. Ananova, A.A. Karpova, Kh.T. Apostolidi

Tomsk State University, Tomsk

Against the backdrop of a changing climate, an increase in the duration of the thunderstorm season and the number of days with a thunderstorm over Western Siberia was noticed. This occurs amid the increasing formation of mesoscale convective complexes of different genesis. There is reason to believe that the ratio of the frequency of occurrence of frontal and intramass thunderstorms has changed over Western Siberia against the background of climate warming. In this paper, the synoptic conditions for the occurrence of thunderstorms over the territory of the southeast of Western Siberia for 2020–2022 are analyzed and compared with similar studies of an earlier period.

Key words: thunderstorm, synoptic conditions, frontal thunderstorms, intramass thunderstorms, baric formations.

Введение

В последние годы все острее ставится вопрос глобального потепления. Изучаются как причины его возникновения и динамика развития, так и последствия таких климатических изменений. Несомненно, процесс такого масштаба влияет на многие области нашей жизни и науки, в том числе на область метеорологии.

Факт потепления подтверждается мониторингом изменения фактических показателей метеорологических, океанологических, гляциологических, химических и других величин биосферы [1]. Это объясняется достаточно просто: из-за роста средней температуры воздуха как в летние, так и в зимние месяцы процесс испарения влаги начинает протекать более активно, вследствие чего конвективные движения происходят чаще и над большим количеством территорий. В таких случаях атмосфера становится неустойчивой и, соответственно, возникают благоприятные условия для образования кучево-дождевых облаков и конвективных явлений, таких как грозы, град, шквалы, смерчи.

В условиях увеличения частоты и мощности грозовой активности важно совершенствовать методы прогнозирования опасных конвективных явлений для уточнения выпускаемых прогнозов и шторм-оповещений. Поэтому для синоптика-прогнозиста информация о возможности возникновения и типичных условиях образования гроз в том или ином синоптическом процессе будет не только полезна, но и значительно облегчит процесс прогноза погодных условий, а также оперативность составления шторм-оповещений. Все это определяет необходимость проведения исследования региональных особенностей формирования и развития гроз в различных физико-географических условиях, в том числе в Западной Сибири.

Исследованием синоптических условий возникновения гроз на территории Западной Сибири в разные годы занимались Н.М. Алексина [2], Р.А. Ягудин [3, 4], Э.А. Морозова [5], В.П. Горбатенко [6–11]. Грозы на территории Иркутской области изучали И.В. Латышева, К.А. Лощенко [12], Е.В. Шахаева [12–14]. На данный момент есть различные методы прогнозирования опасных явлений, но ни один из них не дает стопроцентной гарантии качества прогноза.

Целью настоящей работы является выявление синоптических условий, приводящих к грозам над юго-востоком Западной Сибири, а также изучение характерных отличий гроз, сформировавшихся в различных синоптических условиях.

Период исследования составил три года, с 2020 по 2022 г.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Построить карту распределения числа дней с грозой по Томской области за период с 2020 по 2022 г.; определить время наибольшей повторяемости грозовой деятельности в Томской области.

2. Сформировать таблицы типизации грозовой деятельности, провести анализ и определить синоптические условия возникновения гроз на юго-востоке Западной Сибири по синоптическим картам.

3. Сравнить полученные результаты с более ранними исследованиями и выявить закономерности.

Материал и методы исследования

Для исследования были просмотрены записи журнала «Шторм» Томской области за период с 2020 по 2022 г., предоставленные Томским центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ТЦГМС).

Из журналов были выписаны следующие параметры для каждого случая с грозой: название станции, дата (число, месяц, год), время начала и окончания грозы. Так как регистрация гроз, как и наблюдения на метеостанциях, производится по всемирному скоординированному времени (ВСВ), в данном исследовании использовалось время ВСВ. Данные о грозах были перенесены в электронные таблицы и отсортированы по месяцам за каждый год для дальнейшего более углубленного анализа. За один случай принималась одна гроза на одной станции.

Для анализа синоптических условий возникновения гроз были исследованы приземные синоптические карты за основные синоптические сроки (00, 06, 12, 18 ВСВ) и кольцевые карты погоды (за сроки 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 ВСВ) из архива авиационной метеорологической станции гражданской авиации города Томска (АМСГ Томск). Данные о синоптических ситуациях в сроки, ближайшие к моменту возникновения гроз, были занесены в таблицы и обработаны. За время исследования было проанализировано порядка 2500 синоптических карт, а число случаев с грозой за три года составило 2137. По приземным синоптическим картам для каждого случая определялись следующие синоптические характеристики: тип атмосферного фронта, тип барического образования, давление в центре барического образования, траектория смещения (для циклона). Выводы получены при использовании синоптических методов, пакетов прикладных программ Microsoft и Paint.

Повторяемость гроз на юго-востоке Западной Сибири за 2020–2022 гг.

Динамика грозовой деятельности на юго-востоке Западной Сибири за три года показана в табл. 1 и на рис. 1.

Максимальное количество случаев с грозой было зафиксировано в июле 2020 г. и составило 282 случая. Минимальное число случаев фикси-

Таблица 1

Число случаев с грозой на юго-востоке Западной Сибири с 2020 по 2022 г.

Месяц \ Год	2020	2021	2022
Апрель	12	6	2
Май	122	106	81
Июнь	185	159	266
Июль	282	221	159
Август	224	156	108
Сентябрь	28	2	16
Октябрь	2	–	–
Всего за год	855	650	632

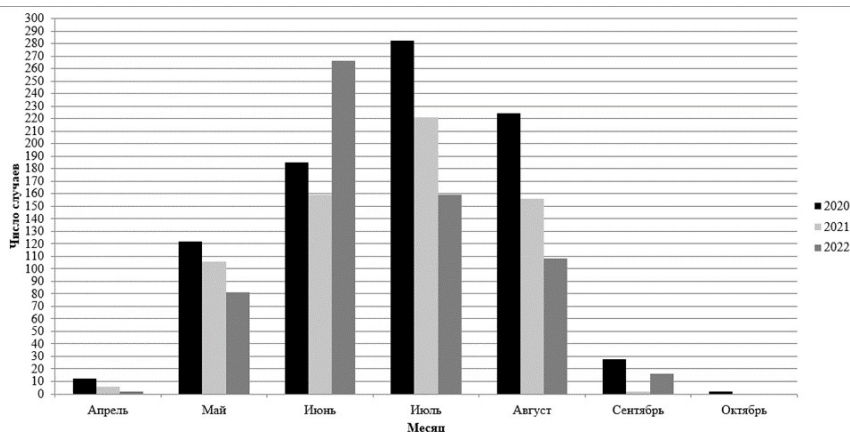


Рис. 1. Распределение числа случаев с грозой за каждый год с 2020 по 2022 по месяцам

ровалось в начальные и конечные месяцы грозового сезона: апрель (2 случая в 2022 г.), сентябрь (2 случая в 2021 г.). Самые поздние грозы были отмечены в октябре 2020 г. – 2 случая. Отмечено постепенное уменьшение числа случаев с грозой с 2020 по 2022 г.

В июне 2022 г. наблюдается резкий скачок числа случаев с грозой, который и составил максимальное значение для июня за 3 года – 266 случаев. Возможно, это связано с повышенным фоном температуры и влажности в этом месяце.

В целом можно заметить, что исследование с 2020 по 2022 г. относится к периоду высокой грозовой активности.

Такие же временные рамки наблюдались в распределении грозовой активности в Иркутской области (1987–2009 гг.) в исследовании [12]. В исследовании [6] временные рамки грозового сезона над Томской областью

за период 1966–1995 гг. ограничены апрелем и ноябрем. То есть можно говорить о достаточном постоянстве длительности грозового сезона над Западной и Восточной Сибирью. Выводов о сокращении грозового сезона, так как в данном исследовании последним месяцем с грозой был октябрь, мы делать не можем из-за разных временных промежутков исследований.

При оценке прогнозов и штормовых предупреждений опасных явлений погоды учитывается не только категория явления и район его распространения, но и разница во времени между предполагавшимся и фактическим началом этого явления [4]. Поэтому изучение времени возникновения и продолжительности гроз является очень важным.

Грозы различного генезиса, а также грозы, связанные с атмосферными фронтами, имеют различный и точно определенный суточный ход [15]. Но есть и такие ситуации, когда конвективная деятельность может обостриться в любое время суток, как, например, на фронте окклюзии.

По данным о начале каждого случая с грозой за период с 2020 по 2022 г. был построен график суточного хода грозовой деятельности (рис. 2).

В результате исследования суточного хода гроз установлено, что чаще всего грозы возникали во вторую половину дня: в 8–11 ч по ВСВ – это 15–18 ч по местному времени. Минимальные значения приходятся на 3 и 19 ВСВ, это соответствует 10 ч утра и 2 ч ночи по местному времени.

Наибольший вклад в суточный ход грозовой деятельности вносят грозы на холодных фронтах, фронтах окклюзии и грозы во внутримассовых условиях, а наименьший – грозы на теплых фронтах. В исследовании Р.А. Ягудина [4] максимум в суточном ходе гроз (1964–1970 гг.) в районе Новосибирска также приходится на 15–18 ч, а минимум – на период 6–9 ч местного времени. То есть можно сказать, что суточный ход грозовой активности на юго-востоке Западной Сибири достаточно однороден.



Рис. 2. Суточный ход повторяемости (%) грозовой деятельности на юго-востоке Западной Сибири

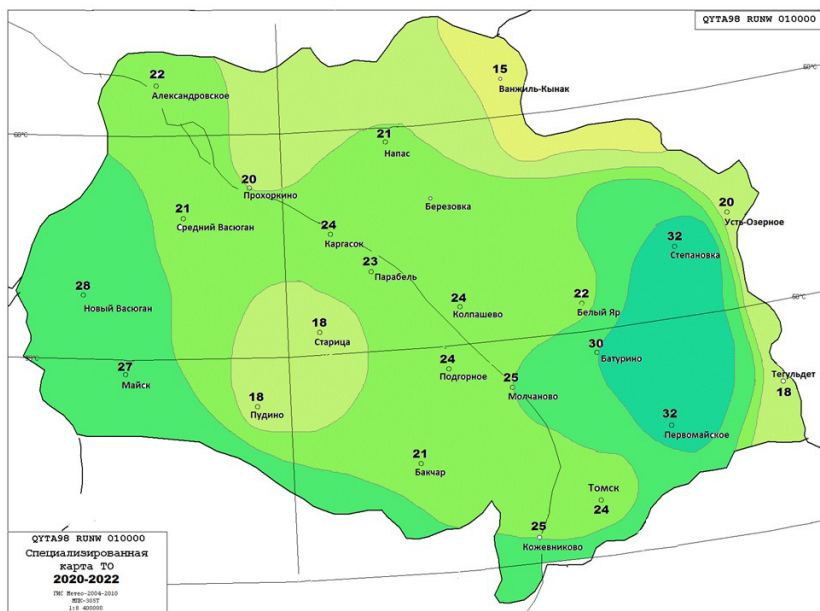
Распределение среднего числа дней с грозой по юго-востоку Западной Сибири

Одним из параметров грозовой активности на территории является число дней с грозой. На рис. 3 представлена карта распределения среднего числа дней с грозой по станциям Томской области с 2020 по 2022 г.

На карте хорошо прослеживается увеличение значений с северо-востока на юго-запад с очагом максимума в районе метеостанций Степановка и Первомайское (32 дня) и минимальными значениями в районе метеостанции Ванжиль-Кынак (15 дней).

В целом можно расценивать период нашего исследования с 2020 по 2022 г. как период высокой грозовой активности на юго-востоке Западной Сибири.

В работе В.П. Горбатенко [7] сказано, что среднее число дней с грозой в Томской области может колебаться от 15 до 30. В исследовании [6] максимальное среднее значение числа дней с грозой за период 1966–1995 гг.



Шкала числа дней с грозой



10 15 20 25 30 35

Рис. 3. Распределение среднего числа дней с грозой по территории Томской области с 2020 по 2022 г.

составило 28 дней, минимальное – 17 дней. Можно сказать о небольшом увеличении грозовой активности в районах максимальных значений и уменьшении грозовой активности в северной части области. Также важно упомянуть о том, что карта распределения среднего числа дней с грозой по Томской области, построенная в рамках исследования [6], несколько отличается от карты, построенной в нашем исследовании. По данным В.П. Горбатенко и Т.В. Ершовой [6], максимальные значения находятся как в Майске и районе Степановки, так и в районах метеостанций Бакчар и Колпашево. Тогда как в нашем исследовании район Колпашево имеет средние значения по области, а район метеостанции Бакчар – ниже среднего.

В работе [2] Томская область была разделена на два района по характеристикам грозовой деятельности. Первый район охватывает долину среднего течения Оби, низовья рек Тима, Васюгана, долину Кети, бассейны Чулыма, Шегарки. В этом районе средняя повторяемость гроз составляет 22–26 дней. Во втором районе значения чуть больше – 26–33 дня. В целом цифры настоящего исследования хорошо вписываются в эту статистику, но минимальное значение на северо-востоке области в 15 дней с грозой, конечно, выбивается из нее. Важно отметить, что основное отличие в том, что первый район пролегает по речной сети, а второй, с максимальными значениями, находится на юго-западе и северо-востоке. Тогда как на карте, построенной в нашем исследовании, отчетливо прослеживается увеличение грозовой деятельности с северо-востока на юго-запад области, т. е. минимальные значения зафиксированы именно на северо-востоке области.

В исследовании Е.В. Шахаевой [14] за период с 2000 по 2013 г. в Иркутской области максимальное среднее число дней с грозой составляет 15 дней, минимальное – 1 день. В сравнении с данным исследованием это достаточно маленькие значения. То есть можно сказать, что на Томскую область большое влияние оказывают местные факторы, способствующие образованию грозовой деятельности, траектория прохождения барических образований и пролегания атмосферных фронтов, а также ее западное положение относительно Иркутской области.

Синоптические условия образования гроз над юго-востоком Западной Сибири

Для более детального изучения синоптических условий и возникновения опасных явлений, в частности гроз, в каждом типе барических образований в исследовании использовалась классификация, разработанная В.П. Горбатенко, И.И. Ипполитовым и Н.В. Поднебесных [16, 17]. В этой методике барические образования подразделяются на несколько типов по месту зарождения и траектории движения.

В соответствии с этой классификацией выделяются барические образования, приходящие на территорию Западной Сибири и влияющие на погодные условия, такие как:

I – западные циклоны, перемещающиеся из центральных районов Европейской России к Восточно-Сибирскому плоскогорью вдоль 60–65° с.ш.;

II – западные циклоны, образующиеся на волне полярного фронта в районе Екатеринбург, Омск, Самары;

III – юго-западные циклоны, приходящие из районов Каспийского и Аральского морей и смещающиеся на северо-восток;

IV – северные циклоны, образующиеся в Карском море и северных районах Западной Сибири, смещаются на юг-юго-восток;

V – южные циклоны, приходящие из районов Ашхабада, Ташкента или из междуречья Амударьи и Сырдарьи, смещаются на северо-восток;

VI – местные циклоны, образующиеся непосредственно на территории Западной Сибири: на южной части или в районе междуречья Обь–Иртыш. Ведут себя достаточно статично и имеют минимальные вектора смещения, из которых нет возможности выделить преобладающий;

VII – северные циклоны, которые приходят из районов Кольского полуострова, Баренцева моря или севера европейской территории России, смещаются на юго-восток в направлении Омска.

С VIII по XII – типы антициклонов, приходивших на территорию Западной Сибири и образовавшихся над ней.

Для выявления региональных особенностей возникновения гроз на юго-востоке Западной Сибири по кольцевым картам погоды определялся тип барического образования, при котором возникали грозы.

Каждый грозовой случай с 2020 по 2022 г. классифицировался по месяцу и типу барического образования, в котором наблюдался:

1. Циклон (с I по VII тип).
2. Антициклон (с VIII по XII тип).
3. Седловина.
4. Малоградиентное поле.

Результаты исследования представлены в табл. 2.

Анализ синоптических условий при возникновении гроз на юго-востоке Западной Сибири показал, что абсолютное большинство гроз (87,4 %) в этом районе возникает в циклонах различного происхождения. Максимальная повторяемость гроз наблюдается в июле в местных циклонах (VI тип) – 10,5 %, а также чуть меньше в юго-западных циклонах (III тип) – 8,6 %. В июне грозы чаще всего (6,8 %) наблюдались при выходе южных циклонов V типа.

Максимальная повторяемость гроз на юго-востоке Западной Сибири фиксируется при выходе юго-западных циклонов (III тип) – 17,8 % и в

Таблица 2

**Повторяемость гроз (%) в различных типах барических образований
с 2020 по 2022 г.**

Типы барических образований	Месяцы							Всего за сезон
	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	
I	0,5	2,0	2,8	4,8	1,5	0,6	–	12,2
II	0,1	3,1	4,0	0,4	3,7	0,2	–	11,5
III	0,3	3,9	0,7	8,6	3,6	0,7	–	17,8
IV	–	1,5	1,2	–	2,4	–	–	5,1
V	–	0,4	6,8	1,5	4,3	–	–	13,0
VI	–	–	4,1	10,5	1,9	0,2	0,1	16,8
VII	–	1,8	5,8	2,2	1,2	–	–	11,0
VIII	–	0,3	–	0,3	–	–	–	0,6
IX	–	–	1,0	–	–	–	–	1,0
X	–	–	–	1,6	3,1	–	–	4,7
XI	–	–	0,7	0,6	–	–	–	1,3
XII	–	0,3	0,4	0,2	0,6	0,1	–	1,6
Седловина	–	0,7	0,9	0,3	0,7	0,2	–	2,8
Малоградиентное поле	–	0,6	–	–	–	–	–	0,6
Всего	0,9	14,6	28,4	31,0	23,0	2,0	0,1	100,0

местных циклонах (VI тип) – 16,8 %. Минимальная повторяемость гроз наблюдалась в антициклоне VIII типа и в малоградиентном поле – 0,6 %.

Анализируя полученные результаты, можно сказать о том, что изначально при анализе синоптических карт было замечено, что местные циклоны (VI) могут достаточно долго находиться на территории Западной Сибири, так как не имеют определенного вектора смещения, а также именно этот тип очень часто регенерировал и увеличивал время своего существования на заданной территории. Юго-западные циклоны (III), несмотря на то что имели вектор смещения и редко стационарировали над исследуемым районом, чаще остальных приходили на юго-восток Западной Сибири, и, соответственно, грозовая деятельность чаще развивалась именно в данном типе барических образований.

В антициклональных условиях грозы наблюдались достаточно редко и в основном на восточной периферии. Всего в антициклонах отмечено 9,2 % всех грозовых случаев. В седловине и малоградиентном поле зафиксировано всего 3,4 % случаев всех гроз.

Можно отметить, что с 2020 по 2022 г. повторяемость гроз в западных циклонах I и II типов и северных циклонах VII типа (ныряющих) почти одинакова и составляет 11–12 %, а вот в северных циклонах IV типа в

данном исследовании она минимальная: 5,1 %. В северных районах Иркутской области [13] грозы чаще всего связаны со смещением ныряющих и западных циклонов, что в целом совпадает с результатами наших исследований.

В исследовании В.П. Горбатенко [7], проводившемся с 1990 по 2010 г., изучение синоптических условий образования гроз осуществлялось по той же классификации барических образований, что и в данной работе. Поэтому сравнение результатов представляет достаточно большой интерес. В исследовании [7] максимальный процент гроз в циклонах приходится на западные циклоны I и II типов (20 % в обоих случаях), а также чуть меньше на северные циклоны IV типа (17,5 %). Эти результаты отличаются от результатов нашего исследования. В местных циклонах (VI) повторяемость гроз почти не изменилась: с 1990 по 2010 г. составила 17 %, с 2020 по 2022 г. – 16,8 %. Так как результаты исследований имеют различия, важно отметить, что период исследования [7] почти в 7 раз превышает период данного исследования. Так что, скорее всего, в [7] вошли различные циркуляции атмосферы, смена которых провоцировала изменение частоты появления различных типов циклонов и траектории их движения на исследуемой территории.

По условиям возникновения грозы делятся на внутримассовые и фронтальные. Внутримассовые грозы образуются в теплых неустойчивых воздушных массах при развитии кучево-дождевых облаков за счет термической конвекции или при резком вторжении холодного воздуха в тыл циклона. Наиболее интенсивные грозы возникают на атмосферных фронтах [18].

Все случаи с грозой за период с 2020 по 2022 г. классифицировались не только по типу барического образования, но также и по наблюдению в зоне фронта (с выделением типа) или во внутримассовых условиях (табл. 3).

Таблица 3

Повторяемость (%) фронтальных и внутримассовых гроз на юго-востоке Западной Сибири с 2020 по 2022 г.

Тип фронта	Месяцы							Всего за сезон
	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	
Теплый	0,7	5,2	6,3	6,9	3,3	0,7	–	23,1
Холодный	0,1	5,2	7,9	10,0	8,0	0,3	0,1	31,6
Окклюзия	0,1	3,1	11,5	7,0	5,7	0,4	–	27,8
Вторичный	–	0,1	1,1	4,1	3,0	0,4	–	8,7
Внутримассовая гроза	–	1,0	1,6	3,0	3,0	0,2	–	8,8
Всего	0,9	14,6	28,4	31,0	23,0	2,0	0,1	100,0

За период исследования максимальные значения повторяемости гроз отмечались на холодных фронтах и фронтах окклюзии – 31,6 и 27,8 % соответственно. Минимальное количество гроз наблюдалось на вторичных холодных фронтах – 8,7 % и во внутримассовых условиях – 8,8 %. Внутримассовые грозы отмечаются в период с мая по сентябрь. В начале и конце грозового сезона отмечаются только фронтальные грозы.

Наибольший процент гроз наблюдался на фронтах окклюзии в июне – 11,5 %, на холодных фронтах в июне, июле и августе – 7,9; 10,0 и 8,0 % соответственно.

Такое распределение было весьма ожидаемо, так как чаще всего условия для грозовой деятельности формируются на холодных фронтах и фронтах окклюзии. Это связано с особенностями возникновения характерных типов облачности для данных фронтов и скоростью их перемещения. Также можно отметить, что 82,4 % от общего количества гроз наблюдалось в летние месяцы, так как это самые теплые месяцы грозового сезона.

Соотношение фронтальных и внутримассовых гроз распределилось примерно как 90 и 10 %.

В работе [7] также проводился анализ повторяемости фронтальных и внутримассовых гроз. Наибольший процент гроз тоже наблюдался на холодных фронтах (34 %), а наименьший – на фронтах окклюзии (5 %). Фронтальные грозы составляли 69 % случаев, внутримассовые – 31 %. В данном случае отличие полученных результатов можно объяснить особенностями синоптических процессов в годы нашего исследования и тем, что в исследовании [7] за случай с грозой принимался случай, когда хотя бы на одной станции Томской области отмечалась гроза. В процессе нашего исследования неоднократно было установлено, что в один день могут отмечаться как фронтальные, так и внутримассовые грозы.

Изучение повторяемости гроз на различных атмосферных фронтах в Иркутской области с 2000 по 2013 г. проводилось в работе [14]. По результатам исследования было выявлено, что чаще всего фронтальные грозы наблюдались на основных и вторичных холодных фронтах (46–77 %), также автор отмечает, что по сравнению с более ранними исследованиями повторяемость гроз на фронтах окклюзии увеличилась (9–14 %).

В работе [8] одной из анализируемых территорий была Западная Сибирь. Исследование проводилось по обширному списку параметров грозовой деятельности, в том числе было рассчитано соотношение фронтальных и внутримассовых гроз с 1967 по 1971 г. Наибольший процент фронтальных гроз наблюдался на холодных фронтах (33 %), что чуть больше значений в данном исследовании, а наименьший опять же на фронтах окклюзии (5 %), тогда как с 2020 по 2022 г. грозы на фронтах окклюзии составили 27,8 %. Также стоит отметить, что в рамках исследования [8]

фронтальные грозы составили 67 % от общего количества гроз, тогда как в настоящей работе на долю фронтальных гроз приходится чуть больше 90 % общего количества гроз. Автор [8] отмечает, что в исследовании не были учтены как таковые вторичные фронты, а все грозы в тылу циклона были отнесены к внутримассовым. Возможно, из-за этого процент фронтальных гроз получился чуть заниженным.

Заключение

В рамках данного исследования было установлено хорошо прослеживаемое распределение числа случаев с грозой: увеличение грозовой активности с северо-востока на юго-запад. За каждый год исследуемого периода (2020–2022) выявлены центры максимальной грозовой активности в районе метеостанции Степановка (41–54 случая), расположенной на востоке Томской области, и метеостанции Майск (73–78 случаев), расположенной на западе области. Величина среднего числа дней с грозой за три года возрастает с северо-востока на юго-запад с очагом максимума в районе метеостанции Степановка (30–32 дня) и минимальными значениями в районе метеостанции Ванжиль-Кынак (15 дней).

Суточный ход повторяемости гроз очень хорошо согласуется с повторяемостью фронтальных и внутримассовых гроз. Максимальная повторяемость приходится на 15–18 ч по местному времени. Минимальные значения приходятся на 2 ч ночи и 10 ч утра по местному времени. Аналогичные результаты были получены в исследовании [4], т. е. можно сказать, что суточный ход грозовой активности на юго-востоке Западной Сибири достаточно однороден.

В целом грозовой сезон на юго-востоке Западной Сибири стабильно начинается в апреле и заканчивается в сентябре. В некоторые годы отдельные грозы наблюдаются и в октябре. Максимальная грозовая активность приходится на центральный летний месяц – июль. Аналогичное распределение было получено в более ранних исследованиях В.П. Горбатенко [6] и И.В. Латышевой [12]. То есть длительность грозового сезона в Западной и Восточной Сибири сохраняет постоянство. Также стоит отметить, что с 2020 по 2022 г. наблюдался период высокой грозовой активности.

Барические образования, в которых чаще всего возникают грозы – конечно, циклоны. Согласно классификации [16, 17] в рамках данного исследования наибольшая повторяемость гроз была зафиксирована в юго-западных (III) и местных циклонах (VI): 17,8 и 16,8 % соответственно. По сравнению с более ранними исследованиями, в изучаемый период настоящей работы (2020–2022) увеличилась повторяемость гроз в юго-западных циклонах (III), а в северных (IV типа) – уменьшилась.

Наибольший вклад в грозовую деятельность вносят грозы на холодных фронтах и фронтах окклюзии, а наименьший – на вторичных фронтах и внутримассовые грозы. В работах [7, 8, 14] наибольшая повторяемость гроз так же отмечена на холодных фронтах и чуть меньше – на теплых, а наименьшая – на фронтах окклюзии.

Соотношение фронтальных и внутримассовых гроз распределилось примерно как 90 и 10 %. По сравнению с предыдущими исследованиями [8] повторяемость фронтальных гроз увеличилась, а внутримассовых – уменьшилась.

Резюмируя, можно сказать о том, что при сравнении с результатами более ранних наблюдений было выявлено достаточно много неоднозначных моментов. Помимо разного периода исследований, такие результаты объясняются еще и зависимостью грозовой деятельности от большого количества факторов. Так как основной из них – барические образования, нетрудно догадаться, что общая циркуляция атмосферы постоянно вносит коррективы как в развитие барических образований, так и в траектории их движения, а соответственно, изменяются динамика и характеристики грозовой деятельности. Также не стоит забывать о местных особенностях исследуемых территорий. Даже если территория исследования одна и та же в нескольких исследованиях, стоит учитывать возможность изменения ее характеристик во времени, которые в свою очередь влияют на местные процессы, происходящие на ней, в том числе и на конвективную деятельность.

Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования синоптических методов прогноза гроз.

Литература

1. Третий оценочный доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год / Под ред. В.М. Катцова; Росгидромет. СПб.: Научно-емкие технологии, 2022. 676 с.
2. *Алехина Н.М.* Грозы юго-востока Западной Сибири и северо-востока Казахстана: Дис. ... канд. геогр. наук. Томск, 1982. 144 с.
3. *Ягудин Р.А.* Физико-статистическое исследование ночных гроз в Новосибирской области // Труды НРГМЦ. 1971. Вып. 6. С. 9–23.
4. *Ягудин Р.А.* Синоптические факторы, обуславливающие время начала грозовой деятельности // Синоптическая метеорология. Труды ЗСРНИГМИ. 1975. Вып. 15. С. 115–127.
5. *Морозова Э.А., Ягудин Р.А.* О прогнозе ночных гроз в Новосибирской области // Труды НРГМЦ. 1971. Вып. 5. С. 17–24.
6. *Горбатенко В.П., Ершова Т.В.* Молния как звено глобальной электрической цепи: монография. Томск: Изд-во ТГПУ, 2011. 203 с.
7. *Горбатенко В.П.* Синоптические условия образования гроз над Томской областью // Климатология и гляциология Сибири: сб. материалов 2 междунар. науч. конф. (Томск, 20–23 окт. 2015 г.). Томск, 2015. 386 с.

8. *Горбатенко В.П.* Синоптические условия образования и развития гроз над территориями Западной Сибири и Казахстана // Вестн. Том. гос. ун-та. 2001. С. 148–154.
9. *Горбатенко В.П., Дульзон А.А.* Влияние изменения подстилающей поверхности на грозовую активность // География и природ. ресурсы. 1997. № 2. С. 142–146.
10. *Горбатенко В.П., Дульзон А.А., Решетова М.В.* Пространственные и временные вариации грозовой активности над Томской областью // Метеорология и гидрология. 1999. № 12. С. 21–28.
11. *Дульзон А.А., Горбатенко В.П.* Результаты исследования грозовой активности над территорией Томской области // Изв. Том. политехн. ун-та. 2006. Т. 309, № 2. С. 126–130.
12. *Латышева И.В., Лоценко К.А., Шахаева Е.В.* Исследование гроз на территории Иркутской области // Изв. Иркут. гос. ун-та. Серия: Науки о Земле. 2012. Т. 5, № 2. С. 163–175.
13. *Шахаева Е.В.* Конвективные явления на территории Иркутской области в 2000–2013 гг. // Изв. Иркут. гос. ун-та. Серия: Науки о Земле. 2015. Т. 12. С. 136–152.
14. *Шахаева Е. В.* Метеорологические и синоптические условия образования ливневых осадков и гроз на территории Иркутской области: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Казань, 2016. 23 с.
15. *Беспалов Д.П., Девяткин А.М., Довгалюк Ю.А. и др.* Атлас облаков. Федер. служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), Гл. геофиз. обсерватория им. А.И. Воейкова. СПб.: Д'АРТ, 2011. 248 с.
16. *Горбатенко В.П., Ипполитов И.И., Поднебесных Н.В.* Циркуляция атмосферы над Западной Сибирью // Метеорология и гидрология. 2007. № 5. С. 28–36.
17. *Поднебесных Н.В.* Динамика циклонической и антициклонической активности над Сибирью: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Томск, 2010. 22 с.
18. *Богаткин О.Г.* Авиационная метеорология. СПб.: Изд. РГГМУ, 2005. 328 с.

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ОПТИЧЕСКОГО ПОТОКА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

А.Б. Колкер^{1,2}

¹ ФГБУ «Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт», Новосибирск

² ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», Новосибирск

Методы оптического потока находят все более широкое применение в метеорологии. В статье рассматриваются популярные методы, нашедшие свою реализацию в пакете OpenCV применительно к задаче обработки спутниковых изображений. Сделаны выводы о рамках применимости и даны рекомендации по настройке параметров.

Ключевые слова: оптический поток, дистанционное зондирование Земли, оценка полей ветра.

COMPARISON OF THE EFFICIENCY OF OPTICAL FLOW TECHNIQUES FOR THE AUTOMATED ESTIMATION OF METEOROLOGICAL FIELD DISPLACEMENT

A.B. Kolker^{1,2}

¹ Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute, Novosibirsk

² Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk

Optical flow techniques are increasingly being used in meteorology. The article discusses popular techniques that have found their implementation in the OpenCV package in relation to the task of satellite image processing. Conclusions are drawn about the scope of applicability and recommendations are given for setting the parameters.

Key words: optical flow, remote Earth sensing, wind estimation.

Введение

Алгоритмы оптического потока являются важными источниками данных во многих прикладных задачах, связанных с отслеживанием пере-

мещений объектов на изображениях. В связи с развитием оптических и радиолокационных методов наблюдения, методы оптического потока становятся все более популярны в метеорологии. Так, например, в работе [1] алгоритм TV11 [2] решает задачу определения характеристик атмосферы, необходимых для вычисления турбулентности, а в работе [3] применяется для решения задачи наукастинга грозовой активности. Для решения задач, связанных с регистрацией и отслеживанием локальных явлений атмосферы по данным спутникового зондирования и радиолокационным изображениям, требуется обеспечить высокую детальность определения метеорологических параметров. Методы оптического потока являются перспективным инструментом для решения подобных задач. Ранее этот подход использовался автором в [4] при построении алгоритма наукастинга атмосферной турбулентности с применением данных дистанционного зондирования Земли космическими аппаратами «Арктика-М1». В процессе выполнения работ была отмечена большая вариативность результата в зависимости от задаваемых настроечных параметров алгоритма. Темой настоящей работы является сравнительный анализ различных подходов к определению оптического потока, а также построение рекомендаций по настройке алгоритма применительно к исходным данным, полученным с космического аппарата, оснащенного регистрирующей аппаратурой МСУ-ГС [5].

Общие положения

Оптическим потоком называют вектора перемещения объектов, зарегистрированных на серии последовательности изображений или массивов данных. Перемещение объектов может быть вызвано как движением объектов относительно камеры, так и движением камеры относительно объектов.

Между последовательными кадрами можно выразить интенсивность изображения I как функцию пространства (x,y) и времени t . Таким образом, изображение в момент времени $t1$ соответствует перемещению пикселей изображения $I(x,y,t)$ на (dx,dy) в течение времени $t - I(x+dx,y+dy,t+dt)$. Важным допущением является тот факт, что интенсивность пикселей при этом не меняется. Очевидно, что при анализе метеорологических полей (как и для многих других задач, связанных с динамикой жидкостей и газов) данное свойство не всегда достижимо, что существенно влияет на качество восстановленных данных.

Однако, опираясь на вышеотмеченное допущение, можно разложить сигнал в ряд Тейлора и сформировать систему уравнений [6].

$$I(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t) = I(x, y, t) + \frac{\partial I}{\partial x} \delta x + \frac{\partial I}{\partial y} \delta y + \frac{\partial I}{\partial t} \delta t \dots$$

Очевидно, что система оказывается недоопределенной, даже если пренебречь всеми членами разложения, кроме первого, (x):

$$\frac{\partial I}{\partial x} \delta x + \frac{\partial I}{\partial y} \delta y + \frac{\partial I}{\partial t} \delta t = 0. \quad (1)$$

Поделив выражение на dt , можно получить уравнение оптического потока:

$$\frac{\partial I}{\partial x} u + \frac{\partial I}{\partial y} v + \frac{\partial I}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

где dI/dx , dI/dy и dI/dt – градиенты изображения по горизонтальной и вертикальной оси и времени. Очевидно, что в данном уравнении два неизвестных, поэтому оно не будет иметь единственного решения.

Проблему поиска оптического потока можно решить несколькими способами, одним из которых может быть отслеживание положения особых точек изображения на последовательности кадров. Особая точка изображения – это локальный фрагмент, обладающий уникальным и узнаваемым набором описания поведения градиентов. Уникальность описания особой точки требует, чтобы в ее окрестностях наблюдались значительные и характерные поведения градиента. Особые точки, как правило, расположены в местах сгущения изолиний яркости изображения (углы фигур, характерные изменения яркости и формы объектов), следовательно, поле данных должно обладать достаточными градиентами и высокими значениями первой производной.

В работе [9] сформулированы общие требования к особым точкам:

- *Отличимость (distinctness)* – особая точка должна явно выделяться на фоне и быть уникальной в своей окрестности.

- *Инвариантность (invariance)* – определение особой точки должно быть независимо к аффинным преобразованиям.

- *Стабильность (stability)* – определение особой точки должно быть устойчиво к шумам и ошибкам.

- *Уникальность (uniqueness)* – кроме локальной отличимости, особая точка должна обладать глобальной уникальностью для улучшения различимости повторяющихся паттернов.

- *Интерпретируемость (interpretability)* – особые точки должны определяться так, чтобы их можно было использовать для анализа соответствий и выявления интерпретируемой информации из изображения.

Очевидно, что для относительно гладких метеорологических полей поиск достаточного количества стабильных во времени особых точек, распределенных по изображению, может оказаться неосуществимой задачей. Исходное изображение может быть подвергнуто свертке для «проявления» градиентов, и/или может быть проведена дискретизация уровней в целях искусственного создания точек экстремумов производных. К сожалению,

такой подход будет весьма чувствителен к шумам измерений и ошибкам географической привязки. Задача отслеживания положения особой точки связана с анализом поведения градиентов в некоторой ее окрестности в рамках последовательности кадров [10]. Очевидно, что данный подход не решает задачу определения поля векторов для каждой точки изображения и называется разреженным (sparse optical flow). Рассмотрим алгоритмы поиска особых точек и пути их описания.

Детектор Моравца (Moravec)

Моравец [11] является основоположником направления анализа особых точек изображения. Детектор Моравца – самый простой из существующих и, как следствие, наименее эффективный. В основе подхода лежит идея сравнения среднеквадратического отклонения яркости квадратного окна W (обычно с апертурой 3×3 , 5×5 , 7×7 пикселей), сдвига окно W на 1 пиксель в 8 направлениях (горизонтальных, вертикальных и диагональных). Основным недостатком детектора Моравца применительно к анализу метеорологических явлений является отсутствие инвариантности к преобразованию поворота, что делает его использование на больших временных шагах нецелесообразным, хотя такой подход для частых измерений с хорошими калибровочными коэффициентами и оказывается наименее вычислительно затратным и сравнительно эффективным. Идея детектора Моравца и его модификации лежат в основе множества методов определения ветра по спутниковым данным облачности.

Детектор углов Харриса (Harris corner detection)

Harris Corner Detector – это оператор обнаружения углов, который традиционно используется в алгоритмах компьютерного зрения для поиска углов и определения особых точек изображения. Алгоритм был представлен Крисом Харрисом и Майком Стефенсом в 1988 г. [12] и представляет собой усовершенствование углового детектора Моравца. Авторы модифицировали детектор Моравца, введя анизотропию по всем направлениям.

Взвешенная сумма квадрата разностей (sum of squared differences (SSD)) между сдвинутым и исходным окном (т. е. изменение окрестности точки (x, y) при сдвиге на (u, v)) равна [12]:

$$\begin{aligned}
 E(u, v) &= \sum_{x, y \in W} W(x, y) (I(x+u, y+v) - I(x, y))^2 \approx \\
 &\approx \sum_{x, y \in W} W(x, y) (I_x(x, y)u + I_y(x, y)v)^2 \approx (xy) M \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}, \quad (3)
 \end{aligned}$$

где $W(x,y)$ – весовая функция (Гаусса или бинарное окно), M – автокорреляционная функция

$$M = \sum_{x,y \in W} W(u,v) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Угол характеризуется большими градиентами функции $E(x,y)$ по всем возможным направлениям (x,y) , что фактически означает большие по модулю собственные значения матрицы M .

Поскольку напрямую считать собственные значения вычислительно затратно, Харрисом и Стефенсом была предложена эмпирическая мера отклика [12]:

$$R = \det M - k(\text{tr} M)^2 > k,$$

где k – эмпирическая константа, лежащая в пределах 0,04–0,06.

Детектор Shi-Thomas [13] опирается на аналогичную математическую идею, отличаясь механизмом вычисления и анализа собственных чисел.

Применим алгоритм детектора Shi-Thomas к массиву точек, полученных в результате преобразования спутникового снимка КА «Арктика-М1»¹ на длине волны 6,3 мкм в проекцию Ламберта с ячейкой ~6 км, для оценки плотности отслеживаемых особых точек для определения векторов ветра (рис. 1).

Очевидно, что плотность особых точек и стабильность их обнаружения недостаточны для построения надежного алгоритма отслеживания их положения, следовательно, алгоритмы, основанные на данном подходе, в рамках целевой задачи не являются эффективными.

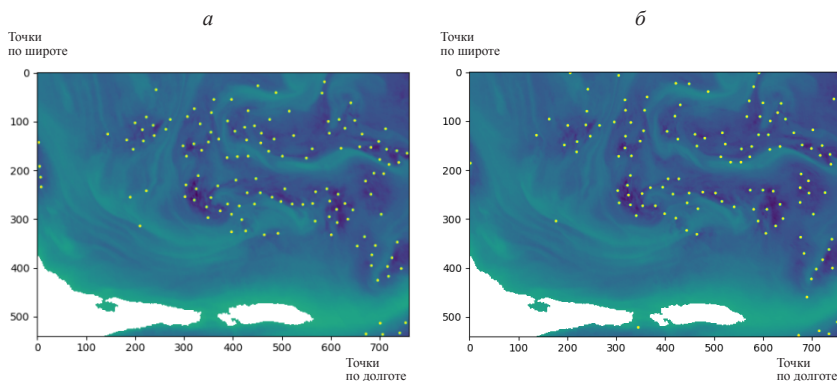


Рис. 1. Поиск особых точек на массивах измерений яркостной температуры в канале 6,3 мкм аппарата «Арктика-М1» (массивы точек по широте и долготе с сеткой 6 км) а) время t ; б) время $t + dt$

¹ Данные спутникового зондирования предоставлены Сибирским центром «НИЦ Планета».

Алгоритмы построения плотного (Dense) потока

Подходы, позволяющие рассчитать оптический поток для каждого положения окна, создают плотный (Dense) оптический поток. Очевидно, что качество построенного решения для всех без исключения подходов в существенной степени зависит от наличия и межкадровой стабильности артефактов градиентов изображения на различных масштабах (модах). Рассмотрим применимость алгоритмов определения плотного (Dense) потока для анализа спутниковых метеорологических данных.

Алгоритм Лукаса–Канаде (Lucas-Kanade: Sparse Optical Flow)

Оригинальный метод [14] (и его модификации) уже многократно рассмотрен в различных публикациях, основан на уравнениях (1) и опирается на следующие предположения:

- при смещении пиксели не меняют собственную яркость;
- соседние пиксели в рамках апертуры смещаются на одинаковое расстояние.

Поиску оптимальных параметров алгоритма посвящено значительное количество публикаций, например [16]. К сожалению, алгоритм не показал способности функционировать на гладких сигналах и для решения поставленной задачи не подходит.

Алгоритм Фарнебека (Farneback Optical Flow)

Метод представлен в публикации [15]. Основная идея метода состоит в аппроксимации соседей каждого пикселя полиномом:

$$I(x)x^T Ax + b^T x + c. \quad (5)$$

Отличие от метода Лукаса–Канаде заключается в повышении точности аппроксимации, поскольку используются два члена разложения. Итоговая задача: вычислить смещение d в $I_2(x) = I_1(x - d)$ с помощью полиномиального разложения.

К сожалению, градиенты в спутниковом снимке яркостной температуры, полученном методом дистанционного зондирования Земли, оказываются явно недостаточными для устойчивого функционирования алгоритма (рис. 2). Алгоритм оказывается неспособным отслеживать сдвиг артефактов изображения целевой задачи. На практике отслеживаются лишь области, где наблюдается переход от точек с неопределенными значениями, следовательно, использование данного алгоритма без дополнительного преобразования исходного изображения также не представляется возможным.

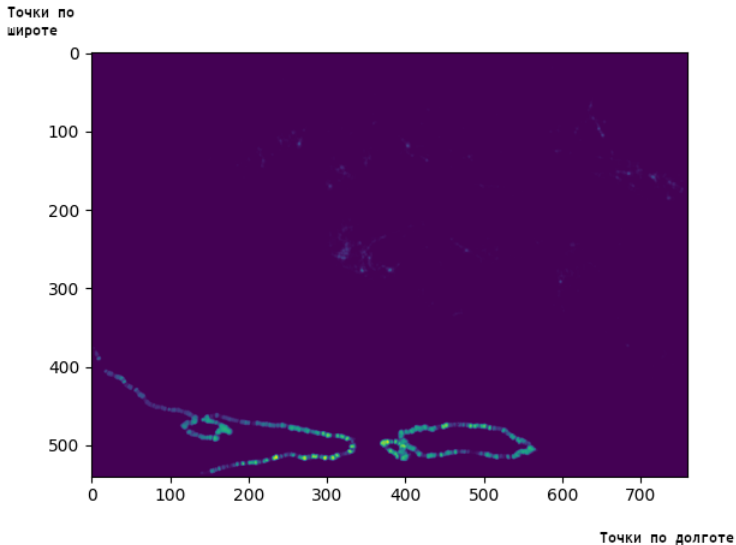


Рис. 2. Поиск векторов оптического потока на массивах измерений яркостной температуры в канале 6,3 мкм аппарата «Арктика-М1» алгоритмом Farneback (массив точек по широте и долготе с сеткой 6 км²)

Алгоритм TvL1

Первоначальная идея алгоритма была предложена в [2] и затем модифицирована в [7]. Алгоритм, реализующий этот метод, можно разделить на два модуля: процедуру, которая вычисляет оптический поток в заданном масштабе, и основной алгоритм, который реализует пирамидальную схему и вызывает процедуру для получения приближенных решений.

Вычислительный эксперимент с рекомендованными по умолчанию параметрами настройки показывает, что алгоритм способен удовлетворительно детектировать вектора оптического потока. Настройке поддаются следующие параметры [4]:

τ – шаг по времени численной схемы. В публикации [7] показано, что численная схема сходится при значениях $\tau < 0,125$. Эмпирически его значение может быть установлено на 0,25 для более быстрой сходимости.

λ – параметр регуляризации. Это наиболее значимый параметр, который определяет гладкость выходных данных. Чем меньше этот параметр, тем более гладкими являются решения. Значение параметра зависит от ожидаемого диапазона магнитуды векторов движений изображений, по-

² Массив узлов сетки COSMO_SIB6.6 по широте и долготе с шагом 6,6.

этому его значение должно быть адаптировано к каждой физичности обрабатываемых изображений.

θ – параметр жесткости. Он служит связующим звеном между пирамидой масштабов и регуляризацией. Метод стабилен при большом диапазоне значений этого параметра.

ε – порог критерия останковки, используемый в численной схеме, задает компромисс между точностью и временем работы. Малое значение дает более точные решения за счет более медленной сходимости.

η – масштабный множитель понижения дискретизации. Он используется для уменьшения масштаба исходных изображений в целях создания пирамидальной структуры. Его значение должно находиться в интервале (0, 1) и также зависит от физичности обрабатываемых данных.

N warps – количество итераций в рамках одного масштаба. Один из основных параметров, обеспечивающих стабильность метода, отражает компромисс между скоростью и точностью.

Как показывают эксперименты, функция оптимизации среднеквадратической ошибки от настроечных параметров имеет несколько локальных минимумов, что соответствует разным их комбинациям (например, разные наборы значений жесткости и регуляризации).

Описание вычислительного эксперимента

Целью вычислительного эксперимента являлось определение оптимальных настроечных параметров алгоритмов вычисления оптического потока применительно к изображениям, полученным с КА «Электро-Л» и «Арктика-М1», оснащенных аппаратурой МСУ-ГС (5, 6, 9-й каналы). В данной работе приводится результат прямого применения алгоритма оптического потока без дополнительного постпроцессинга (используется только медианная фильтрация с окном апертуры 5 в целях подавления импульсного шума). Таким образом, задачей этой работы не является построение полной цепочки алгоритма определения векторов ветра по данным спутникового зондирования, а лишь оптимизация настроечных параметров ключевого алгоритма – определения оптического потока. Полная задача по определению векторов ветра содержит модули вычисления высоты поверхности, а также более сложные алгоритмы постпроцессинга, зачастую с применением априорных данных ЧПП, которые в рамках этой статьи не рассматриваются. Канал 6,3 мкм используется для сравнения с данными численного моделирования, поскольку, пренебрегая некоторыми факторами, его можно весьма приближенно считать соответствующим уровню 500 Гпа [8] схем ЧПП.

Пусть имеется изображение I_1 в момент времени t_1 и I_2 в момент времени t_2 , представляющие спутниковые снимки яркостной температуры

на каналах 6,3 мкм. Для определения оптимальных параметров алгоритма требуется обеспечить расчет ошибки, что, в свою очередь, приводит к необходимости иметь информацию об истинном значении векторов оптического потока в каждой точке изображения, что не представляется возможным.

Выполним следующие шаги:

1. Пиксели гео-привязанного изображения считываются в массивы NumPy, содержащие:

- a. I – интенсивности (яркостную температуру),
- b. матрицы широт и долгот.

2. Выполняется нормализация яркостей.

$$In_{x,y} = \frac{\sum_{x=0}^{Nlon} \sum_{y=0}^{Nlat} I_{x,y} \forall I_{x,y} \neq nan}{k} I_{x,y}, \quad (6)$$

где k – число точек изображения, для которых яркостная температура определена. Нормализация яркостей необходима для нивелирования ошибки определения яркостной температуры, которая, к сожалению, для аппаратов серии «Арктика-М1» полностью до настоящего времени не устранена.

3. Выполняется преобразование всех массивов исходных координат к равновеликой азимутальной проекции Ламберта с центральной точкой: $central_longitude=90$, $central_latitude=65$. Выбор проекции обусловлен тем фактом, что данная проекция сохраняет площади (но не сохраняет углы).

4. Исходное изображение проецируется на узлы сетки COSMO, выполняется поиск ближайшего пикселя изображения к узлу сетки COSMO.

5. Выполняется сдвиг на $-u*t - v*t$ для получения точек изображения $I'm1$

$$I'm1_{ij} = In2_{((i-u(i)*t)/c, (j-v(i)*t)/c)}, \quad (7)$$

где c – размер ячейки в метрах, u, v – проекции скорости.

В работе использована модель COSMO в конфигурации COSMO-SIB, с разрешением 6,6 км и дискретностью по времени 15 мин.

Созданное изображение представляет собой идеализированную картину. Отличия от реального изображения $I1$ обусловлены следующими факторами:

- яркостная температура пикселя реального изображения характеризует значение излучения столба водяного пара или, в случае, когда концентрация водяного пара недостаточна, подстилающей поверхности, что особенно заметно в канале 11,2 длины волны окна прозрачности атмосферы);
- расчетные вектора ветра содержат ошибки моделирования;
- при создании модельного изображения не учитываются вертикальные потоки, хотя они могут также в некоторых случаях оказывать существенное влияние.

Алгоритмы вычисления оптического потока имеют от четырех до семи настроечных параметров. Поиск оптимального значения настроечных параметров выполнялся путем применения линейного спуска. Для алгоритма TVL1 использовались начальные значения настроечных параметров, указанные в [1]. В качестве отправной точки для решения задач оптимизации были использованы следующие значения настроечных параметров:

Таблица 1		Таблица 2	
Значения, подлежащие оптимизации		Фиксированные значения	
τ	0,25	scaleStep	0,85
ε	0,1	nscals	50
λ	0,2	warps	5
θ	0,5	innerIterations	20
		outerIterations	60

На каждом шаге итерации вычислялось N значений среднеквадратического отклонения построенных векторов ветра путем вариаций каждого из настроечных параметров на величину $\pm 5\%$ от исходного значения. По результатам анализа полученных ошибок выполнялся шаг в сторону наибольшего градиента уменьшения ошибки на величину 0,05 от исходного значения. Останов итерационной процедуры выполнялся по достижении критерия максимального количества итераций или изменения ошибки менее $1e-7$ на каждом шаге. График сходимости среднеквадратической ошибки приведен на рис. 3. Программные модули разработаны на языке Питон и выполняются на 16 потоках.

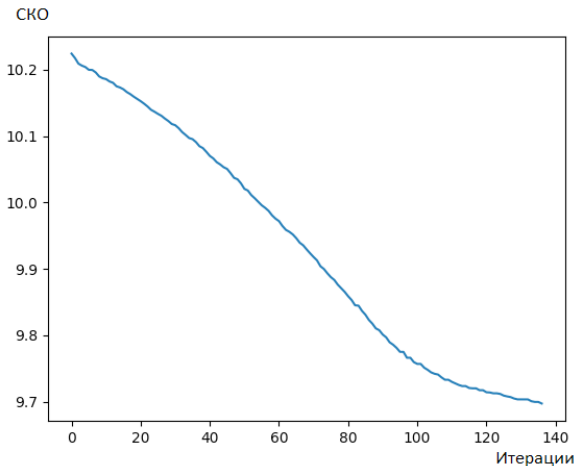


Рис. 3. Сходимость среднеквадратической ошибки при функционировании алгоритма оптимизации

В результате выполнения процедур оптимизации были достигнуты следующие значения настроечных параметров:

Таблица 3

Оптимальные параметры

τ	0,2625
ε	0,1056
λ	1,265
θ	0,8979

Рисунок 4 демонстрирует восстановленные вектора ветра по данным КА «Арктика М1» (15 августа 2022 г., наблюдение в 00:15 и 00:45), восстановленные алгоритмом оптического потока TvL1 с указанными выше настроечными параметрами. Рисунок 5 демонстрирует вектора ветра, восстановленные по модельному изображению. Рисунок 6 демонстрирует вектора ветра, полученные в результате ЧПП с использованием модели CosmoSIB6.6.

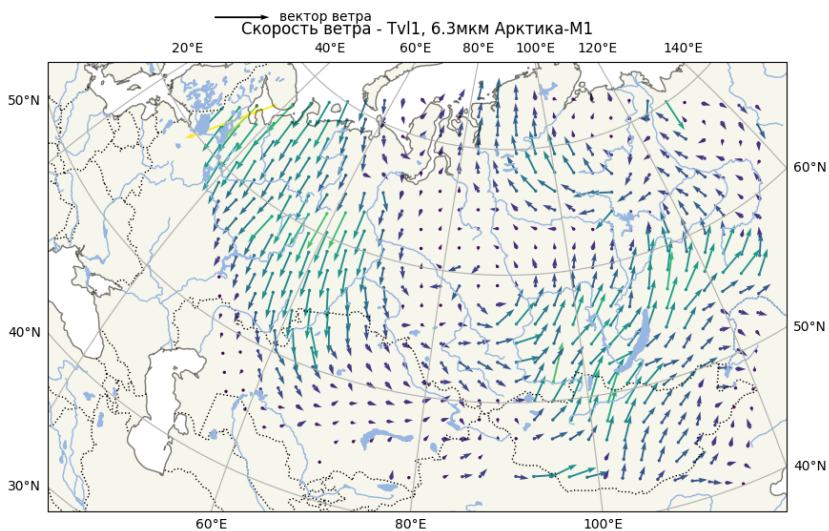


Рис. 4. Вектора ветра, восстановленные алгоритмом TvL1 в найденной оптимальной конфигурации

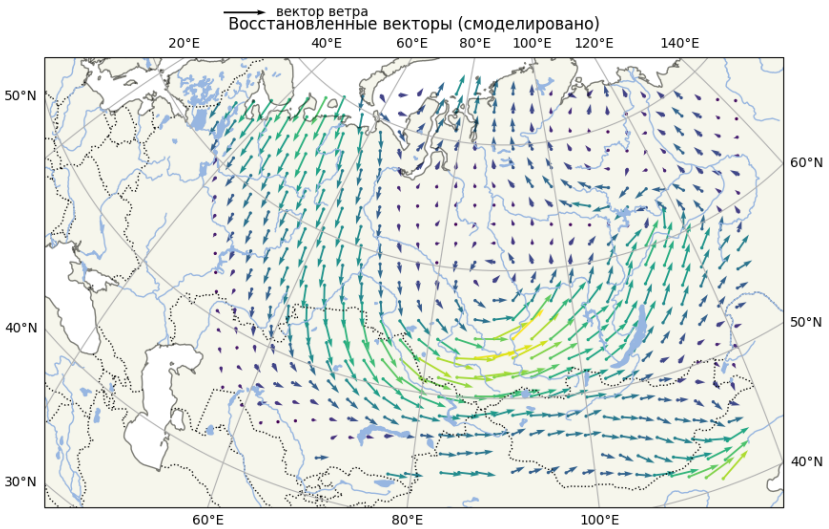


Рис. 5. Вектора ветра, восстановленные алгоритмом оптического потока (смоделированное изображение, идеализированный случай)

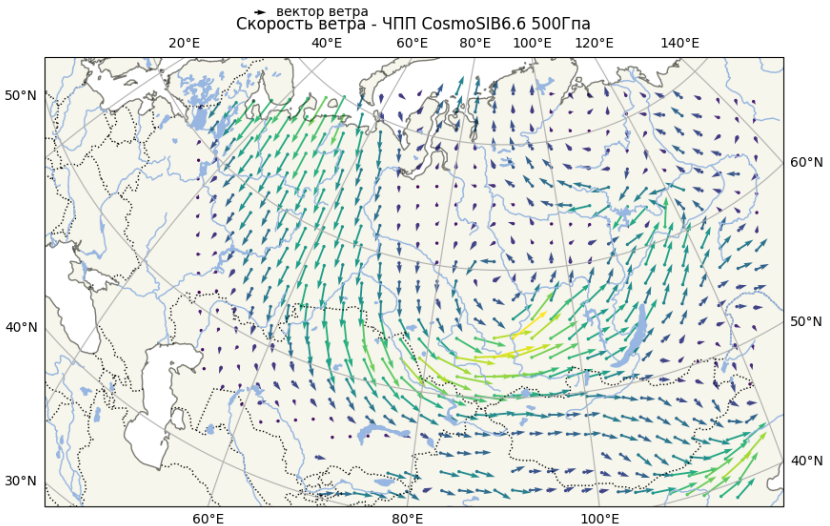


Рис. 6. Вектора ветра на уровне 500 гПа по данным модели COSMO-SIB(6.6)

Анализ полученных результатов

Для определения векторов оптического потока в целевой задаче может быть применен подход TV-L1. Рекомендуется проводить настройку параметров регуляризации в соответствии со значениями параметров, перечисленными в табл. 3. Подход показывает приемлемую работоспособность на реальных изображениях, полученных с КА «Арктика-М1». Алгоритм хорошо восстанавливает направление, ошибаясь в магнитуде векторов. Ошибки обусловлены следующими факторами:

– покрытие регионов Западной Сибири космическими аппаратами, расположенными как на геостационарной, так и на высокоэллиптической орбитах, находится на пределе гарантированного приема аппаратов, зачастую за его границей;

– области струйных течений обладают достаточными артефактами градиентов вдоль направлений линий тока, что делает невозможным устойчивое функционирование алгоритмов оптического потока, что в свою очередь приводит к значительным неточностям восстановления скоростей ветра.

Литература

1. Barleben A., Haussler S., Müller R., Jerg M. A Novel Approach for Satellite-Based Turbulence Nowcasting for Aviation // *Remote Sens.* 2020. Vol. 12. P. 2255. DOI: 10.3390/rs12142255.
2. Sánchez J., Meinhardt-Llopis E., Facciolo G. TV-L1 optical flow estimation // *Image Processing On Line.* 2013. Vol. 3. P. 137–150. DOI: 10.5201/ipol.2013.26.
3. Müller R., Barleben A., Haussler S., Jerg M. A Novel Approach for the Global Detection and Nowcasting of Deep Convection and Thunderstorms // *Remote Sens.* 2022. Vol. 14. P. 3372. DOI: 10.3390/rs14143372.
4. Разработка технологии сверхкраткосрочного (до 12 ч) прогноза погоды опасных для авиации явлений в целях создания на территории Российской Федерации Регионального консультативного центра по опасным для авиации явлениям погоды: Отчет о НИР (промежут.)/ФГБУ «СибНИГМИ»; шифр темы 1.4; рук. А.Б. Колкер. Новосибирск, 2020. 159 с. Рег. № НИОКТР АААА-А20-120012890067-4. Рег. № ИКРБС АААА-Б21-221010290002-5.
5. Аппаратура МСУ-ГС, назначение, основные характеристики и режимы работы [Электронный ресурс]. URL: <http://planeta.infospace.ru/electro/html/msu-gs.html> (дата обращения 25.09.2023).
6. Introduction to Motion Estimation with Optical Flow. [Электронный ресурс]. URL: <https://nanonets.com/blog/optical-flow/> (дата обращения 25.09.2023).
7. Zach C., Pock T., Bischof H. A Duality Based Approach for Realtime TV-L¹ Optical Flow. In: Hamprecht F.A., Schnörr C., Jähne B. (Eds.). *Pattern Recognition. DAGM 2007. Lecture Notes in Computer Science.* 2007. Vol. 4713, Ch. 22. P. 214–223. DOI: 10.1007/978-3-540-74936-3_22.

8. *Shen F., Shu A., Li H., Xu D., Min J.* Assimilation of Himawari-8 imager radiance data with the WRF-3DVAR system for the prediction of Typhoon Soudelor // *Nat Hazards Earth Syst Sci.* 2021. Vol. 21. P. 1569–1582. DOI: 10.5194/nhess-21-1569-2021.
9. *Shi J., Tomasi C.* Good Features to Track. In: *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'94)*. 1994. P. 593–600. DOI: 10.1109/CVPR.1994.323794.
10. *Lindeberg T.* Scale Invariant Feature Transform. 2012. DOI: 10.4249/scholarpedia.10491.
11. *Moravec H.P.* Toward Automatic Visual Obstacle Avoidance // *Proc. Fifth of International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Vol. 1. Cambridge: MA, August 1977. P. 584.
12. *Harris C., Stephens M.* A Combined Corner and Edge Detector // *Proc. 4th Alvey Vision Conference*. 1988. P. 147–151. DOI: 10.5244/C.2.23.
13. *Tomasi C., Kanade T.* Detection and Tracking of Point Features // *Int. J. Comput. Vis.* 1991. Vol. 9. P. 137–154.
14. *Lucas B., Kanade T.* An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision // *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence*. 1981. Vol. 2. P. 674–679.
15. *Farnebäck G.* Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion. In: *Bigun J., Gustavsson T. (Eds.). Image Analysis. SCIA 2003. Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2003. Vol. 2749. DOI: 10.1007/3-540-45103-X_5.
16. *Ермолчев А.Ю., Свирин И.С.* Поиск оптимальных параметров алгоритма Lucas-Kanade // *Евразийское Научное объединение*. 2015. Т. 1, № 6 (6). С. 41–45. EDN TYZCKJ.

ГЛОБАЛЬНАЯ КЛИМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦИРКУЛЯЦИИ СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ И ТЕРМОСФЕРЫ

В.Т. Гуляев

*ФГБУ «Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт», Новосибирск*

В работе представлена трехмерная нестационарная модель циркуляции на высотах средней атмосферы и термосферы. Дано подробное описание уравнений модели и методов их численного решения. Модель базируется на эмпирических моделях нейтрального состава и температуры, электронной концентрации, электрического поля. Показано, что модель воспроизводит все основные особенности глобальной циркуляции.

Ключевые слова: *циркуляция, средняя атмосфера, термосфера, моделирование.*

GLOBAL CLIMATE MODEL FOR THE CIRCULATION OF THE MIDDLE ATMOSPHERE AND THERMOSPHERE

V.T. Gulyaev

*Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute,
Novosibirsk*

The paper presents a three-dimensional non-stationary circulation model at heights of the middle atmosphere and thermosphere. A detailed description of the model equations and methods for their numerical solution is given. The model is based on empirical models of neutral composition and temperature, electron density, electric field. It is shown that the model reproduces all the main features of the global circulation.

Key words: *circulation, middle atmosphere, thermosphere, modeling.*

Введение

В атмосфере Земли в глобальном масштабе осуществляется сложное взаимодействие между энергетическими источниками (в основном солнечное излучение в виде фотонов широкого диапазона длин волн и вы-

сыпавшихся в высоких широтах потоков высокоэнергичных электронов и протонов), фотохимическими, тепловыми и динамическими процессами. Циркуляция атмосферы является одним из основных динамических факторов, определяющих пространственные и временные вариации состава и температуры атмосферы, взаимосвязь процессов от тропосферы до термосферы.

Наиболее развитой на сегодня является глобальная модель атмосферы, разработанная в Национальном центре атмосферных исследований США (NCAR, Boulder), – это модель TIME-GCM для высот 30–500 км Roble and Ridley [1]. В работе Qian et al. [2] приводится описание истории развития моделей NCAR. В дальнейшем на базе этих моделей создана модель земной системы Whole Atmosphere Community Climate Model (WACCM) (Liu et al. [3]) от поверхности Земли до 500 км. Наиболее развитой моделью для высот от поверхности Земли до ≈ 140 км является глобальная климатическая модель WACCM-D (Verropen et al. [4]), в которой подробно учитывается фотохимия D области ионосферы.

В нашей стране в Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) разработана модель CHARM (Chemical Atmosphere Research Model) (Кривоуцкий и др. [5]), которая по решаемым задачам аналогична модели [4]. В этой модели для расчета циркуляции и температуры используется модифицированная модель COMMA (Cologne Middle Atmosphere Model) (Кривоуцкий и др. [6]). В Институте вычислительной математики РАН разрабатывается модель Земной системы, с кругом решаемых задач можно познакомиться в книге [7]. В комплексную модель предполагается включить блоки расчета общей циркуляции атмосферы на высотах 0–90 км с учетом D области ионосферы (Кулямин и Дымников [8]), динамики термосферы на высотах 90–500 км (Кулямин и Дымников [9]) и электронной концентрации F области ионосферы на высотах 100–500 км (Кулямин и др. [10]).

Предлагаемая модель циркуляции на настоящий момент (WSMT) в качестве основных входных параметров использует эмпирические модели нейтрального состава и температуры по модели MSIS90 [11], электронной концентрации по Chiu75 [12]. Электрическое поле в высоких широтах рассчитывается по аналитической модели (Уваров и Барашков [13]), основанной на результатах работы Неррнер [14]. На средних и низких широтах – по модели Richmond et al. [15]. В дальнейшем этот блок циркуляции будет входить в разрабатываемую комплексную глобальную атмосферно-ионосферную модель средней атмосферы и термосферы на высотах 10–600 км (GAIMAT). Блоки расчета состава и температуры нейтральных и заряженных частиц, распространения планетарных волн из тропосферы, электрического поля находятся на разной стадии разработки.

Уравнения модели

Уравнение движения нейтрального газа в сферической географической системе координат (r, θ, λ) (расстояние от центра Земли, коширота, долгота) имеет вид

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + 2[\Omega \mathbf{v}] = -\frac{\nabla p}{\rho} + \mathbf{g} + \frac{\partial}{\rho \partial r} \eta \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial r} + \frac{\delta \mathbf{v}}{\delta t}, \quad (1)$$

где $\mathbf{v} = (v_r, v_\theta, v_\lambda) \equiv (\mathbf{w}, \mathbf{v}, \mathbf{u})$ – скорость; p, ρ – давление и плотность атмосферы; Ω – угловая скорость вращения Земли, \mathbf{g} – гравитационное ускорение; $\delta \mathbf{v} / \delta t = \frac{1}{\rho} \sum_{j=e,i} \rho_j v_{jn} (\mathbf{v}_j - \mathbf{v})$ – источник импульса, обусловленный соударениями с заряженными частицами ионосферы; ρ_j, \mathbf{v}_j – плотность и скорость заряженных частиц (e – электроны и i – ионы сорта i); v_{jn} – частота соударений с нейтральными частицами рассчитывается по Schunk and Nady [16]; коэффициент вязкости по Banks and Kockarts [17]

$$\eta = (3,43[N_2] + 4,03[O_2] + 3,90[O]) T^{0,69} / N_{\text{атм}} [\text{г/см/с}].$$

Скорость \mathbf{v}_j найдем из уравнения движения для заряженной частицы. На высотах ниже ≈ 600 км можно не учитывать соударений между заряженными частицами и в диффузионном приближении

$$v_{jn} (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}) = \frac{e_j}{m_j} \left(\mathbf{E} + \frac{1}{c} [\mathbf{v}_j \mathbf{B}] \right) - \frac{\nabla p_j}{m_j n_j} + \mathbf{g}, \quad (2)$$

где \mathbf{E}, \mathbf{B} – электрическое и магнитное поля, e_j – электрический заряд, c – скорость света. Введем циклотронную частоту $\omega_j = e_j B / (m_j c)$ и фактор замагниченности $\alpha_j = v_{jn} / \omega_j$. Уравнение (2) перепишем в виде

$$\alpha_j \mathbf{v}_j = [\mathbf{v}_j \mathbf{b}] + c \mathbf{E} / B + \mathbf{F}_j / \omega_j, \quad (3)$$

где $\mathbf{b} = \mathbf{B} / B$, $\mathbf{F}_j = -\frac{\nabla p_j}{m_j n_j} + \mathbf{g} + v_{jn} \mathbf{v}$. Для нахождения \mathbf{v}_j дополнительно введем два уравнения, которые получим скалярным и векторным умножением уравнения (3) на вектор \mathbf{b} . В итоге имеем

$$(1 + \alpha_j^2) \mathbf{v}_j = \mathbf{v}_E + \frac{1}{v_{jn}} \left[(\mathbf{F}_j \mathbf{b}) \mathbf{b} + \alpha_j [\mathbf{F}_j \mathbf{b}] + \alpha_j^2 \mathbf{F}_j \right] + \frac{c}{\alpha_j} \left[\frac{(\mathbf{E} \mathbf{b})}{B} \mathbf{b} + \alpha_j^2 \frac{\mathbf{E}}{B} \right], \quad (4)$$

где $\mathbf{v}_E = c[\mathbf{E} \mathbf{b}] / B$ – скорость электромагнитного дрейфа. Поле \mathbf{E} есть сумма внешнего электрического поля (в основном поля магнитосферной конвекции) и внутреннего электрического поля (поля вдоль силовых линий геомагнитного поля – поле амбиполярной диффузии). Внутреннее поле

можно найти из условия равенства нулю продольного электрического тока, а можно проще – из уравнения движения для электронов. Отбрасывая в уравнении малые члены, получим

$$(\mathbf{E}\mathbf{b})\mathbf{b} = \mathbf{E}_{\parallel} = -\frac{\nabla p_e \cdot \mathbf{b}}{en_e} \mathbf{b}. \quad (5)$$

Относительно соотношения (5) заметим следующее. На высотах F2 области ионосферы основным ионом является O^+ . Учитывая соотношение (5) в уравнении (4) и подставляя \mathbf{v}_i в уравнение непрерывности этого иона, получим уравнение диффузии для расчета концентрации O^+ . Выше 160 км $\alpha_i \ll 1$ для O^+ .

Скорость заряженной частицы существенно связана с конфигурацией геомагнитного поля. В геомагнитной системе координат в дипольном приближении

$$B = B_0 Q, \quad B_0 = 0,31 \left(\frac{R_E}{r} \right)^3 \text{ [Гс]}, \quad Q = \sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta_m},$$

$$\mathbf{b} = (-\sin I, -\cos I, 0), \quad \sin I = 2 \cos \theta_m / Q, \quad \cos I = \sin \theta_m / Q.$$

Для вектора \mathbf{v} переход между географической и геомагнитной системами координат дается преобразованиями

$$\mathbf{v}^G = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos D & \sin D \\ 0 & -\sin D & \cos D \end{pmatrix} \mathbf{v}^M, \quad \mathbf{v}^M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos D & -\sin D \\ 0 & \sin D & \cos D \end{pmatrix} \mathbf{v}^G. \quad (6)$$

Углы I и D – наклонение и склонение геомагнитного поля. Наклонение I положительно при отклонении \mathbf{B} вниз от горизонтальной плоскости. Склонение D положительно при отклонении \mathbf{B} к востоку от направления на Северный географический полюс. Угол D определяется соотношениями

$$\left. \begin{aligned} \sin \theta_m \sin D &= -\sin \theta_0 \sin(\lambda - \lambda_0) \\ \sin \theta_m \cos D &= \cos \theta_0 \sin \theta - \sin \theta_0 \cos \theta \sin(\lambda - \lambda_0) \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

Связь между географическими и геомагнитными координатами дается формулами

$$\left. \begin{aligned} \cos \theta_m &= \cos \theta_0 \cos \theta + \sin \theta_0 \sin \theta \cos(\lambda - \lambda_0) \\ \sin \theta_m \sin \lambda_m &= \sin \theta \sin(\lambda - \lambda_0) \\ \sin \theta_m \cos \lambda_m &= -\sin \theta_0 \cos \theta + \cos \theta_0 \sin \theta \cos(\lambda - \lambda_0) \end{aligned} \right\}; \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \cos \theta &= \cos \theta_0 \cos \theta_m - \sin \theta_0 \sin \theta_m \cos \lambda_m \\ \sin \theta \sin (\lambda - \lambda_0) &= \sin \theta_m \sin \lambda_m \\ \sin \theta \cos (\lambda - \lambda_0) &= \sin \theta_0 \cos \theta_m + \cos \theta_0 \sin \theta_m \cos \lambda_m \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

Полнос магнитного диполя в Северном полушарии имеет координаты $\theta_0 = 11,5^\circ$, $\lambda_0 = 291^\circ$. В географической системе координат

$$\mathbf{b}^G = (-\sin I, -\cos I \cos D, \cos I \sin D)$$

и для горизонтальной скорости $\mathbf{u} = (v, u)$ в уравнении (1)

$$\frac{\delta \mathbf{u}}{\delta t} = -\hat{D} \mathbf{u} + \mathbf{F}_E, \quad (10)$$

$$\hat{D} = \begin{pmatrix} R_i (1 - \cos^2 I \cos^2 D) & R_i \cos^2 I \cos D \sin D + S_i \sin I \\ R_i \cos^2 I \cos D \sin D - S_i \sin I & R_i (1 - \cos^2 I \sin^2 D) \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{F}_E = R_i \mathbf{v}_E^G + (c/B) \cdot S_i \mathbf{E}^G = \frac{c}{B} \begin{pmatrix} S_i & -R_i \sin I \\ R_i \sin I & S_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_\theta \\ E_\lambda \end{pmatrix} - \frac{c}{B} R_i E_r \cos I \begin{pmatrix} \sin D \\ \cos D \end{pmatrix},$$

$$E_r = -\cos I \cdot E_\theta^M / \sin I, \quad E_\theta = \cos D \cdot E_\theta^M + \sin D \cdot E_\lambda^M,$$

$$E_\lambda = \cos D \cdot E_\lambda^M - \sin D \cdot E_\theta^M,$$

$$R_i = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\rho_e v_{en}}{1 + \alpha_e^2} + \sum_i \frac{\rho_i v_{in}}{1 + \alpha_i^2} \right) = \left(\frac{B}{c} \right)^2 \frac{\sigma_P}{\rho}, \quad S_i = \sum_i \frac{\rho_i v_{in}}{1 + \alpha_i^2} \alpha_i = \left(\frac{B}{c} \right)^2 \frac{\sigma_H}{\rho},$$

σ_P , σ_H – педерсеновская и холловская проводимости.

Уравнение (1) в вертикальном направлении для крупномасштабных процессов имеет вид

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -\rho g. \quad (11)$$

Вертикальную скорость определим из уравнения непрерывности для атмосферы

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) = 0. \quad (12)$$

Привлекая условие гидростатического равновесия (11), имеем:

$$g \frac{\partial}{\partial r} \rho w = \frac{1}{r \sin \theta} \left(\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta v \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(u \frac{\partial p}{\partial r} \right) \right) + \frac{\partial^2 p}{\partial t \partial r}. \quad (13)$$

Методы решения уравнений модели

Решение уравнения (1) проведем методом расщепления [18]. На временном интервале $\tau = t_{j+1} - t_j$ уравнение (1) запишем в порядке решения:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (k_R + \hat{D})\mathbf{u} + 2\Omega \cos \theta \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{u} = -\frac{\nabla_{\perp} p}{\rho} + \mathbf{F}_E, \quad (14)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + w^j \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial r} = \frac{\partial}{\rho \partial r} \eta \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial r}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + v^j \frac{\partial \mathbf{u}}{r \partial \theta} + u^j \frac{\partial \mathbf{u}}{r \sin \theta \partial \lambda} + \text{ctg} \theta \frac{u^j}{r} \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{u} = 0. \quad (16)$$

В представленном варианте модели в уравнение (14) введен коэффициент релевского трения k_R как наиболее простой вариант параметризации волнового сопротивления Schoeberl and Strobel [19]. В современных моделях волновое сопротивление представлено как следствие разрушения внутренних гравитационных волн (ВГВ), а импульс и энергия вкладываются в циркуляцию и тепловой баланс. Параметризация эффектов разрушения ВГВ, начиная с работ Lindzen [20] и Matsuno [21], продолжает развиваться, см. Medvedev and Klaassen [22].

Решение уравнений (14), (15) не вызывает затруднений, отметим только следующее. Аппроксимация производной по времени имеет первый порядок. В уравнении (15) вязкий член – второй порядок, вертикальный перенос учитывает направление: в узле k по высоте член $w^j (\partial \mathbf{u} / \partial r)$ при $w_k^j > 0$ аппроксимируется как $w_k^j \cdot (\mathbf{u}_k - \mathbf{u}_{k-1}) / dh_{k-1}$, при $w_k^j < 0$ – $-w_k^j \cdot (\mathbf{u}_{k+1} - \mathbf{u}_k) / dh_k$. Уравнение решаем методом прогонки. Нижнее граничное условие – решение уравнения (14), верхнее граничное условие (ВГУ) – $\partial \mathbf{u} / \partial r = 0$.

Уравнение (16) для узла координатной сетки на сфере (θ, λ) имеет решение

$$\left. \begin{aligned} v(t_{j+1}, r, \theta, \lambda) &= v_0 \cos(\delta \lambda) + u_0 \sin(\delta \lambda) \\ u(t_{j+1}, r, \theta, \lambda) &= u_0 \cos(\delta \lambda) - v_0 \sin(\delta \lambda) \end{aligned} \right\}, \quad (17)$$

$$\delta \lambda = -\int_{t_j}^{t_{j+1}} \frac{u^j}{r} \text{ctg} \theta dt = \int_{\lambda_0}^{\lambda} \cos \theta d\lambda.$$

Здесь v_0, u_0 – значения компонентов скорости, вычисленных по уравнению (15), в точке (r, θ_0, λ_0) . Эта начальная точка находится из решения уравнения характеристик

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{v^j}{r}, \quad \frac{d\lambda}{dt} = -\frac{u^j}{r \sin \theta}. \quad (18)$$

Вычисляется та точка, перенос из которой привел бы в исходный узел координатной сетки. При вычислении траекторий основной шаг по времени τ дробится. В высоких широтах для устранения расходимости осуществляется переход к координатам $x = \sin \theta \cos \lambda$, $y = \sin \theta \sin \lambda$. Уравнения (18) принимают вид

$$\left. \begin{aligned} dx/dt &= -(\cos \theta v^j \cos \lambda - u^j \sin \lambda) / r \\ dy/dt &= -(\cos \theta v^j \sin \lambda + u^j \cos \lambda) / r \end{aligned} \right\}.$$

На полюсах решением уравнения (16) при учете (17) будет

$$\left. \begin{aligned} v(t_{j+1}, r, \theta, \lambda) &= \text{sign}(\cos \theta)(v_1 \cos \lambda + v_2 \sin \lambda) \\ u(t_{j+1}, r, \theta, \lambda) &= v_2 \cos \lambda - v_1 \sin \lambda \end{aligned} \right\}, \quad (19)$$

где

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= \text{sign}(\cos \theta) v_0 \cos \lambda_0 - u_0 \sin \lambda_0 \\ v_2 &= u_0 \cos \lambda_0 + \text{sign}(\cos \theta) v_0 \sin \lambda_0 \end{aligned} \right\}. \quad (20)$$

В соответствии с (19), уравнение (14) на полюсах преобразуется в уравнение для вектора $\mathbf{u}_p = (v_1, v_2)$. В окрестности полюсов $p = p_0 + \sin \theta (p_1 \cos \lambda + p_2 \sin \lambda)$, $\mathbf{p} = (p_1, p_2)$ и

$$\frac{\partial \mathbf{u}_p}{\partial t} + (k_R + \hat{D}_p) \mathbf{u}_p + 2\Omega \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{u}_p = -\frac{\mathbf{p}}{\rho} + \mathbf{F}_{Ep}, \quad (21)$$

$$\hat{D}_p = \begin{pmatrix} R_i (1 - \cos^2 I_0 \cos^2 \lambda_0) & -R_i \cos^2 I_0 \cos \lambda_0 \sin \lambda_0 + S_i \sin I_0 \\ -R_i \cos^2 I_0 \cos \lambda_0 \sin \lambda_0 - S_i \sin I_0 & R_i (1 - \cos^2 I_0 \sin^2 \lambda_0) \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{F}_{Ep} = \text{sign}(\cos \theta) \frac{c}{B} \left[\begin{pmatrix} -S_i & R_i \sin I_0 \\ -R_i \sin I_0 & -S_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix} - \cos I_0 E_r \begin{pmatrix} \sin \lambda_0 \\ -\cos \lambda_0 \end{pmatrix} \right],$$

$$E_\theta = -(E_1 \cos \lambda + E_2 \sin \lambda)$$

$$E_\lambda = -\text{sign}(\cos \theta)(E_2 \cos \lambda - E_1 \sin \lambda),$$

$$E_1 = \text{sign}(\cos \theta) \cos \lambda_0 E_\theta^M - \sin \lambda_0 E_\lambda^M$$

$$E_2 = \text{sign}(\cos \theta) \sin \lambda_0 E_\theta^M + \cos \lambda_0 E_\lambda^M.$$

В окрестности полюсов $v = \text{sign}(\cos \theta) \cdot (v_0 \sin \theta + v_1 \cos \lambda + v_2 \sin \lambda)$. Тогда уравнение для вертикальной скорости на полюсах

$$g \frac{\partial}{\partial r} \rho w = \frac{1}{r} \left(2v_0 \frac{\partial p_0}{\partial r} + v_1 \frac{\partial p_1}{\partial r} + v_2 \frac{\partial p_2}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 p_0}{\partial t \partial r}. \quad (22)$$

Верхнее граничное условие получим интегрированием уравнения непрерывности от верхней границы до бесконечности. При учете ВГУ для горизонтальной скорости и ограниченности w имеем

$$g\rho w = \frac{1}{r \sin \theta} \left(\frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta v p) + \frac{\partial}{\partial \lambda} (u p) \right) + \frac{\partial p}{\partial t}$$

или

$$g\rho w = \frac{1}{r} (2v_0 p_0 + v_1 p_1 + v_2 p_2) + \frac{\partial p_0}{\partial t}.$$

Скорость v вычисляется в узлах координатной сетки с числом узлов по высоте $N = 50$ (шаг линейно возрастает по узлу k и $dh_1 = 2,6$ км, $dh_{N-1} = 21,5$ км), по широте $L = 38$ ($d\theta = 4,86^\circ$), по долготе $M = 24$ ($d\lambda = 15^\circ$). Шаг по времени $\tau = 10$ мин. В начальный момент мирового времени $UT = 0$ с начальным условием $v = 0$ решение уравнений находим методом установления и далее находится периодическое по UT решение. Ионный состав и электрическое поле рассчитываются в геомагнитных координатах и переводятся в географическую систему координат.

Результаты расчетов

Расчеты проведены для декабрьского солнцестояния при низкой ($F_{10,7} = 75$) и средней солнечной активности ($F_{10,7} = 150$), умеренной геомагнитной возмущенности ($K_p = 3$). На рисунках меридиональная скорость направлена на север. Наиболее общие особенности циркуляции видны на рис. 1, 2. Зональная скорость в летнем полушарии направлена в основном на запад, а в зимнем полушарии – на восток. Однако в летнем полушарии в узком высотном интервале вблизи 100 км наблюдается вторжение восточного потока. В средней атмосфере наблюдаются мощные струйные зональные течения с центром на средних широтах. В нижней стратосфере осуществляется меридиональный перенос к полюсам с восходящими потоками в летнем полушарии и нисходящими в зимнем полушарии (циркуляция Бревер–Допсона). На высотах мезосферы в меридиональном ветре наблюдаются в экваториальной области интенсивные мезосферные струи. В работе [1] отмечается, что использование вместо коэффициента релеевского трения модифицированной после [22] формы распада ВГВ (Fritts and Lu [23]) позволило при сохранении струй не ослаблять проникновение на высоты термосферы суточному приливу. На больших высотах меридиональная скорость направлена в основном из летнего полушария в зимнее с нисходящими потоками в средних широтах. В термосфере система циркуляции испытывает сильную зависимость от солнечной активности. Дополнительно к рис. 1 смотрите рис. 2, где приведены карты ветра на высоте 300 км для двух уровней солнечной активности (СА).

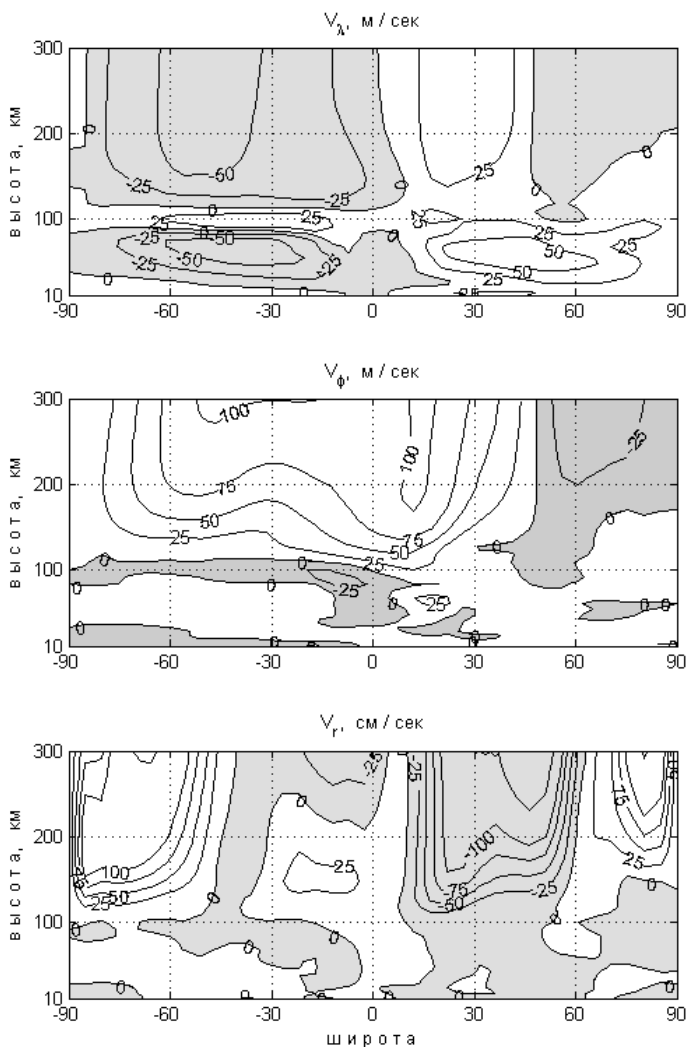


Рис. 1. Среднезональная циркуляция

Динамическое состояние термосферы в значительной мере определяется высокоширотными источниками: электрическим полем и высыпанием высокоэнергичных заряженных частиц. Электрическое поле приводит в движение ионосферную плазму, которая через процессы соударений с нейтральными частицами снабжает термосферу источниками энергии (джоулев нагрев) и импульса.

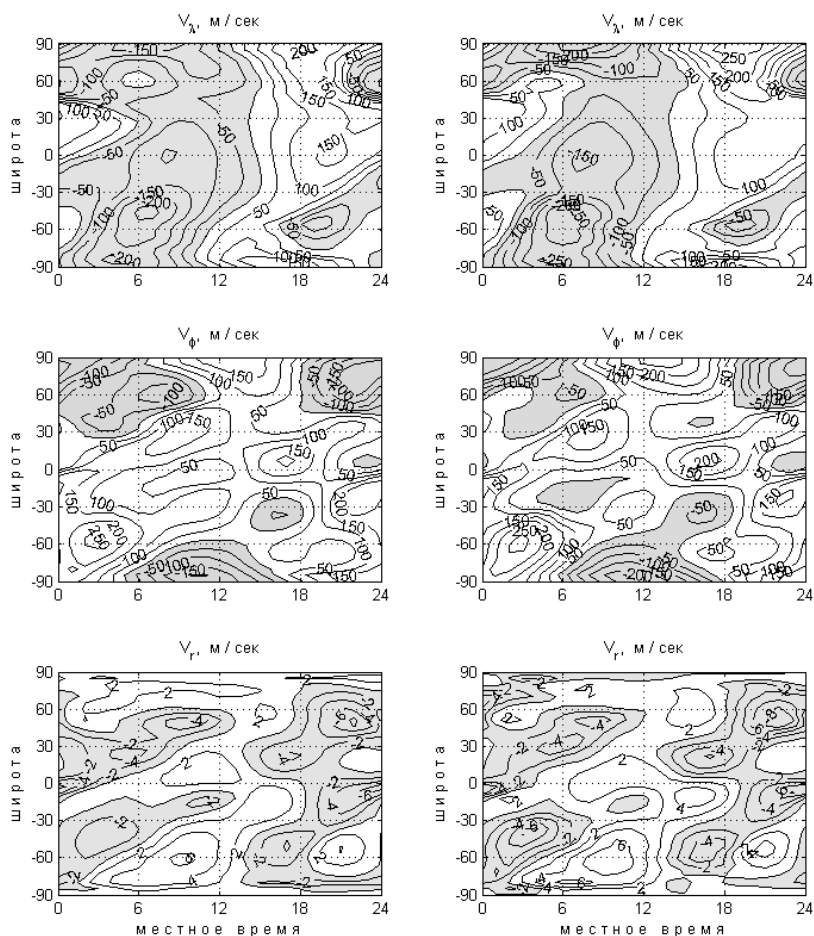


Рис. 2. Циркуляция на высоте 300 км при низкой (левый столбец) и средней солнечной активности (правый столбец), выделенная в зависимости от местного времени

Высыпающиеся частицы увеличивают тепловые притоки в термосферу аналогично поглощению солнечной радиации. При низкой СА роль высокоширотных источников по влиянию на циркуляцию более значительна по сравнению с высокой СА. При низкой СА направленный днем к полюсам ветер более слаб, а в ночные часы направленный к экватору ветер сильнее, чем при высокой СА. Несовпадение географического и геомагнитного полюсов существенно влияет на систему циркуляции, так как морфология зон выпадения частиц и конфигурация электрического поля

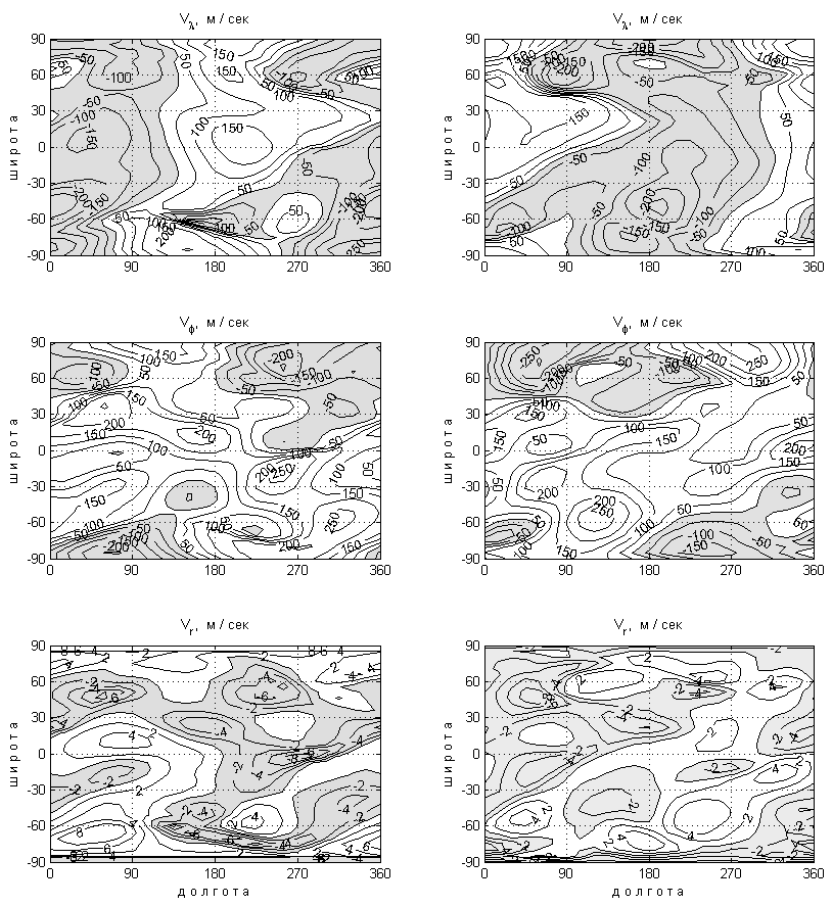


Рис. 3. Циркуляция на высоте 300 км при UT = 6 ч (левый столбец) и при UT = 18 ч

привязаны к геомагнитной системе координат. Это приводит к значительным долготным (LN) и по мировому времени (UT) вариациям параметров термосферы, что иллюстрирует рис. 3, где приведены широтно-долготные карты ветра на высоте 300 км при низкой СА для 6 и 18 ч UT. В эти моменты времени расположение географического и геомагнитного полюсов по направлению Солнце–Земля противоположно. Дополнительно на рис. 4 приведены амплитуды первой гармоники по местному времени, долготе и по UT.

Обращает на себя внимание наличие в средней атмосфере зимнего полушария мощных долготных возмущений, вызванных распространением крупномасштабных возмущений (планетарных волн) из тропосферы.

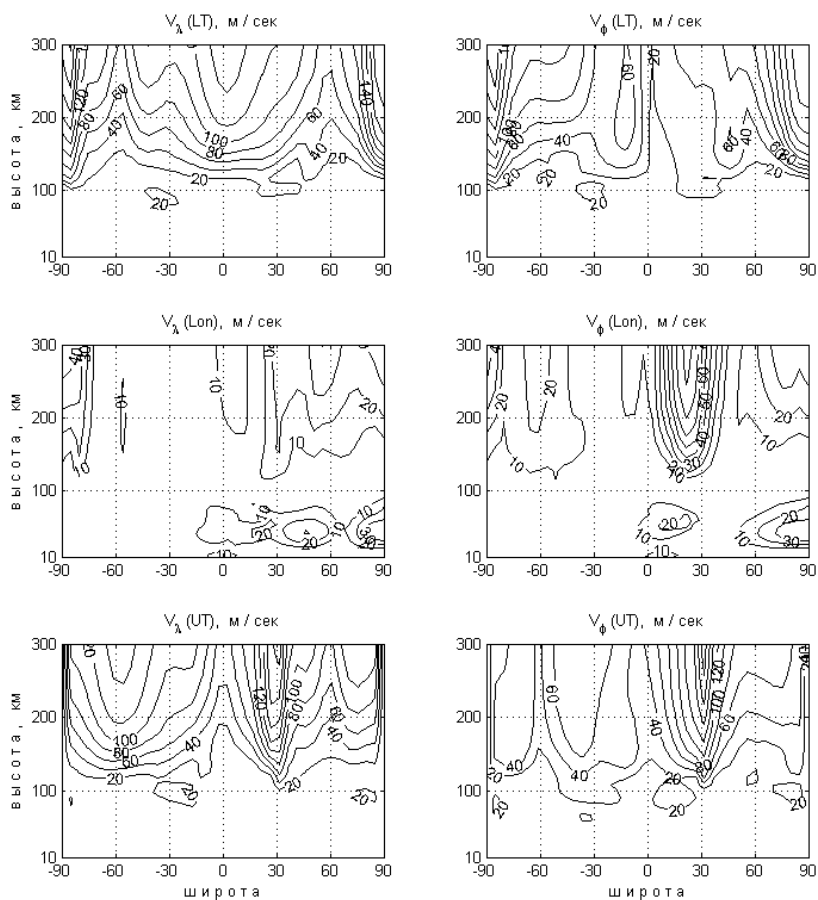


Рис. 4. Амплитуды первых гармоник по местному времени, долготе и мировому времени для зональной скорости (левый столбец) и меридиональной скорости (правый)

В термосфере неожиданно сильными оказались рассчитанные унитарные вариации, возможно основным механизмом их формирования является передача импульса от электромагнитного дрейфа ионов нейтральному газу.

Заключение

Некоторые методы численного решения уравнений модели могут быть использованы, например: при учете ветрового переноса температуры и нейтральных составляющих, примесей атмосферы, ионов в D и E областях ионосферы.

Представленная модель воспроизводит все основные особенности циркуляции атмосферы. Намечены пути совершенствования модели – переход от релеевого трения к учету эффектов распада ВГВ, что может быть использовано и в блоке расчета теплового режима атмосферы.

Литература

1. *Roble R.G., Ridley E.C* A thermosphere-ionosphere-mesosphere-electrodynamics general circulation model (TIME GCM): Equinox solar cycle minimum simulations (30–500 km) // *Geophys. Res. Lett.* 1994. Vol. 21, No. 6. P. 417–420.
2. *Qian L., Burns A., Emery B.A. et al.* The NCAR TIE-GCM: A community model of the coupled thermosphere/ionosphere system In: J. Huba, R. Schunk, G. Khazanov (Eds.). *Modeling the Ionosphere-Thermosphere System*, AGU Geophysical Monograph Ser. 2014. Vol. 201. P. 73–83. DOI: 10.1002/9781118704417.
3. *Liu H.L., Foster B.T., Hagan M.E. et al.* Thermosphere extension of the Whole Atmosphere Community Climate Model // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. A12302. DOI: 10.1029/2010JA015586.
4. *Verronen P.T., Andersson M.T., Marsh D.R., Kovacs T., Plane J.M.C.* WACCM-D – Whole atmosphere community climate model with D-region ion chemistry // *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2016. Vol. 8. P. 954–975. DOI: 10.1002/2015MS000592.
5. *Криволуцкий А.А., Вьюшкова Т.Ю., Банин М.В.* Глобальная трехмерная численная фотохимическая модель CHARM. М.: ГЕОС, 2021. 135 с.
6. *Криволуцкий А.А., Черепанова Л.А., Деметьева А.В. и др.* Глобальная циркуляция атмосферы Земли на высотах от 0 до 135 км, рассчитанная с помощью модели ARM. Учет вклада солнечной активности // *Геоматематизм и аэрономия*. 2015. Т. 55, № 6. С. 808–828.
7. *Математическое моделирование Земной системы / Под ред. Н.Г. Яковлева, ИВМ РАН.* М.: МАКС Пресс, 2016. 328 с.
8. *Кулямин Д.В., Дымников В.П.* Моделирование общей циркуляции тропосферы–стратосферы–мезосферы с включением D-слоя ионосферы // *Гелиогеофизические исследования*. 2014. Вып. 10. С. 5–44.
9. *Кулямин Д.В., Дымников В.П.* Трехмерная модель динамики термосферы // *Гелиогеофизические исследования*. 2014. Вып. 7. С. 15–42.
10. *Кулямин Д.В., Останин П.А., Дымников В.П.* Моделирование F слоя земной ионосферы. Решение уравнений амбиполярной диффузии // *Математическое моделирование*. 2019. Т. 31, № 4. С. 57–74.
11. *Hedin A.E.* Extension of the MSIS Thermosphere Model into the Middle and Lower Atmosphere // *J. Geophys. Res.* 1991. Vol. 96, No. A2. P. 1159–1172. DOI: 10.1029/90JA02125.
12. *Chiu Y.T.* An improved phenomenological model of ionospheric density // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1975. Vol. 37, No. 12. P. 1563–1570.
13. *Уваров В.М., Барашков П.Д.* Модель непрерывного распределения крупномасштабных электрических полей с учетом зависимости от Kp -индекса (препринт). Якутск, 1988. 12 с.
14. *Heppner J.P.* Empirical models of high-latitude electric fields // *J. Geophys. Res.* 1977. Vol. 82, No. 7. P. 1115–1125.

15. *Richmond A.D., Blanc M., Emery B.A., Wand R.H., Fejer B.G., Woodman R.F., Ganguly S., Amayenc P., Behnke R.A., Calderon C., Evans J.V.* An empirical model of quiet-day ionospheric electric fields at middle and low latitudes // *J. Geophys. Res.* 1980. Vol. 85. P. 4658–4664.
16. *Schunk R.W., Nagy A.F.* Ionospheres: Physics, Plasma physics, and Chemistry. Cambridge University Press, 2009. 628 p.
17. *Banks P.M., Kockarts G.* Aeronomy, Part B. Elsevier, New York, 1973. 355 p.
18. *Марчук Г.И.* Численные методы в прогнозе погоды. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 356 с.
19. *Schoeberl M.R., Strobel D.F.* The zonally averaged circulation of the middle atmosphere // *J. Atmos. Sci.* 1978. Vol. 35. P. 577–591.
20. *Lindzen R.S.* Turbulence and stress owing to gravity wave and tidal breakdown // *J. Geophys. Res.* 1981. Vol. 86, No. C10. P. 9707–9714.
21. *Matsuno T.* A quasi one-dimensional model of the middle atmosphere circulation interacting with internal gravity waves // *J. Meteor. Soc. Japan.* 1982. Vol. 60, No. 1. P. 215–226.
22. *Medvedev A.S., Klaassen G.P.* Parameterization of gravity wave momentum deposition based on nonlinear wave interactions: basic formulation and sensitivity tests // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2000. Vol. 62. P. 1015–1033.
23. *Fritts D.C., Lu W.* Spectral estimates of gravity wave energy and momentum fluxes. Part II: parameterization of wave forcing and variability // *J. Atmos. Sci.* 1993. Vol. 50. P. 3695–3713.

АНАЛИЗ МЕТОДИЧЕСКИХ И АЛГОРИТМИЧЕСКИХ ВОПРОСОВ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОГНОЗА ПЕРЕХОДОВ ТЕМПЕРАТУРЫ ЧЕРЕЗ НОЛЬ И СВЯЗАННЫХ С НИМИ ГОЛОЛЕДНЫХ ЯВЛЕНИЙ

В.М. Токарев

*ФГБУ «Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт», Новосибирск*

В рамках единого подхода к анализу и прогнозу физически связанных процессов фазовых переходов воды и перехода температуры воздуха (поверхностей) через 0 систематизируются проблемы соответствующих данных наблюдений, их классификации, кластеризации для логической причинно-следственной привязки к прогнозируемым модельным параметрам атмосферы. Одним из ключевых выделяется фактор отсутствия формализации, исследований и наблюдений за таким опасным и сложным явлением антропогенного происхождения, как гололедица. Представлена авторская типизация совместных факторов перехода температуры через 0 и фазовых переходов в виде гололедицы и гололеда (изморозевые явления не рассматриваются).

Для возможности машинного обучения и прогноза предварительно выполнен большой объем по структурной обработке и построению синхронных массивов выходных характеристик двух прогностических моделей (COSMO-Ru_Sib13 и GFS) и подготовленных данных 4-летних наблюдений по станциям Урало-Сибирского региона в соответствии с предложенной типизацией льдообразующих явлений на поверхностях антропогенного происхождения. Описаны алгоритмические этапы вычислительных экспериментов для получения устойчивых статистических решений в виде логических бинарных деревьев.

Ключевые слова: гололедные явления, прогноз, температура, статистические решения, логические бинарные деревья.

ANALYSIS OF METHODOLOGICAL AND ALGORITHMIC ISSUES OF THE RESEARCH AND FORECAST OF ZERO TEMPERATURE TRANSITIONS AND RELATED GLAZE PHENOMENA

V.M. Tokarev

Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute, Novosibirsk

Within the framework of a unified approach to the analysis and prediction of physically related processes of phase transitions of water and the transition of air

(surface) temperature through zero, the problems of relevant observational data, their classification, and clustering are systematized for a logical causal link to the predicted model parameters of the atmosphere. One of the key factors is the lack of formalization, research and observation of such a dangerous and complex phenomenon of anthropogenic origin as an ice crusted ground. The author's typification of the joint factors combining temperature transition through zero and phase transitions in the form of ice crusted ground and glaze is presented (rime phenomena are not considered).

For the possibility of machine learning and forecasting, a large amount of structural processing and building of synchronous arrays of output characteristics of two forecasting models (COSMO-Sib and GFS) as well as prepared data of 4-year observations at stations of the Ural-Siberian region was previously performed in accordance with the proposed typification of ice-forming phenomena at surfaces of anthropogenic origin. The algorithmic stages of computational experiments for obtaining stable statistical solutions in the form of logical binary trees are described.

Key words: *glaze phenomena, forecast, temperature, statistical solutions, logical binary trees.*

1. Гололед и гололедица

Гололед – очень опасное метеорологическое явление, поскольку покрывает все поверхности на определенной территории, и защититься от этого невозможно, только частично снизить ущерб при быстром реагировании. К счастью, для Урало-Сибирского региона это весьма редкое явление (за исключением районов с наветренной стороны Уральских гор), требующее тонкого сочетания термодинамических условий в нижних слоях атмосферы.

Гололедица – отдельное следствие определенных погодных условий во всем списке гололедно-изморозевых явлений. Фактически гололедица – явление антропогенного происхождения. В не затронутой человеком природе она незаметна, поскольку вода стекает, впитывается или испаряется быстрее, чем наступает похолодание и замерзание. Редкие лужицы могут оставаться и замерзать только в скальных углублениях или глубоких следах животных. А вот разновидностей гололедицы в городах может быть много, и наблюдается она слишком часто для коммунальных служб, чтобы с ней могли быстро справиться.

Видимо, неопределенность классификации гололедицы из-за множества антропогенных факторов и невозможность их воспроизведения на метеоплощадке не позволили включить ее в список наблюдений и в код КН-01. Поэтому авторам пришлось разработать собственный вариант типизации гололедицы в виде комплексов метеоусловий, способствующих ее появлению и сохранению.

Особенности гололедных явлений (ГЯ):

– неочевидная актуальность ГЯ для Сибири превышает привычную проблемность и морозов, и снегопадов – явлений, к которым приспособились все: население, городские и дорожные службы, транспорт и предприятия;

– с ГЯ все по-другому: объективно сложная для потребителей, журналистов и даже самих синоптиков классификация, статистика и перекрестные причинно-следственные связи явлений;

– самое частое, «рукотворное», но наиболее проблемное для прогнозов и защиты от него явление – гололедица;

– и это явление погоды, приносящее самые массовые травмы населению, аварии и материальные потери автотранспорту, коммунальным и дорожным службам – не наблюдается и не фиксируется в оперативных сводках погоды!

Список наблюдаемых гололедных явлений на метеостанциях разумно ограничен фиксацией явлений природного характера. А потому данных о гололедице нет. Их можно объективизировать посредством кодировки комплекса необходимых условий для ее образования или сохранения.

Авторам пришлось разработать дополнительную типизацию гололеда и морфологическую – для гололедицы, взяв за основу априорные потенциальные метеоусловия и динамику погоды, влияющие на образование, сохранение и ослабление гололедных явлений.

Разработанная первичная типизация гололедицы включает варианты:

1. Замерзание после жидких осадков:

1а) быстрое замерзание, почти все поверхности;

1б) «местами». Замерзание лужиц после стекания, частичного высыхания.

2. Замерзание после оттепели (снежный покров):

2а) быстрое замерзание, почти все поверхности;

2б) «местами». Замерзание лужиц, мокрого снега после стекания, частичного высыхания.

3. «Скрытая». Тонкий свежий снежный покров после типов 1 или 2.

4. «Местами а». Замерзание после дневной «солнечной» оттепели (–3... –7 °С).

5. «Местами б». Стабильно-морозная без осадков погода. Постепенное (до нескольких суток) уплотнение до скольжения неочищенных пешеходных и автодорожных участков.

Варианты 1 и 2 – самые очевидные для осени и весны, а с остальными все сложнее. Неоднозначность «скрытого» варианта 3 следует из характеристик выпавшего снега, его толщины, слипания и пр. Но для пешеходов этот случай – один из самых опасных из-за скрытой непредсказуемости. Также неожиданными, а потому особо опасными могут быть

пятнистые подтаивания на солнце с последующим подмерзанием отдельных участков дорог и тротуаров (вариант 4).

Особую морфологию имеют постепенные уплотнения неубранного снега пешеходами и автотранспортом (вариант 5). Самые травматические и аварийные места хорошо известны (подходы к крупным торговым центрам, остановкам транспорта и, конечно, зоны торможения перед светофорами, перекрестками, спусками. Причем зачастую более опасные места формируются даже не там, где совсем снег не убран, а там, где это сделано запоздало и/или неаккуратно. Усугубляются последствия этого варианта тем, что он может повторяться многократно в течение всего длинного сезона с выпадением снега.

Еще больше запутывает динамику гололеда и гололедицы «жизненный цикл». Многообразие природных факторов (осадки, солнце, ветер, температура, фазовые переходы) и антропогенные «усилия» за и против скольжения ставят почти неразрешимые задачи для прогнозирования опасностей и рисков, связанных с гололедными явлениями. Поэтому авторы надеются не решить, а хотя бы привлечь внимание к проблеме – не «где светлее», а где «ближе к травматологии».

Варианты типизации послужили основой для алгоритмической формализации и детального кодирования погодных ситуаций (табл. 1).

В табл. 2 представлены частотные характеристики расширенных кодов гололедных явлений за 2014–2017 гг. по станциям Урала, Сибири и Якутии.

Максимальные и средние по станциям частоты имеют столь большой разброс, что это требует отдельного методического рассмотрения, причем есть вопросы и к наблюдательной сети (гололед КН-01). Ясен, однако, масштаб влияния явлений поверхностного фазового перехода воды на здоровье и безопасность людей, не говоря уже о транспортных коллапсах и потерях. Просто это почему-то считается неизбежным, как восход-заход солнца. Конечно, на станции Нырб дни совсем без условий для гололедицы найти трудно, но и в урало-сибирских мегаполисах их хватает.

Рассмотрим картирование по разработанным кодам условий погоды и наблюдаемого гололеда (рис. 1–9, табл. 3).

Картирование в целом показывает ожидаемые максимумы гололеда на наветренных западных склонах Уральского хребта, а частоты расчетных кодов трансформации-ослабления существенно меньше. Восточнее Урала частота гололеда резко снижается. Повторяемость условий гололедицы (всех типов) высокая на большей части южной Сибири, Якутии и предгорий Алтая. Заметны и местные (видимо орографические) различия станций.

Большие частотные различия в данных для статистического обучения (распознавания класса предиктанта) требуют специальных алгоритмических подходов. Как правило, а не исключение, редкие явления и погодные условия – самые востребованные объекты прогнозирования и

Таблица 1

Расширенное кодирование гололеда и гололедицы: условия и расшифровка

Код	Гололед
1	Гололед: без условий, берется из сводок КН-01
3	Гололед сохраняется. Условия: после кода 1, пока снег ≤ 1 см, $tn \leq -1$, $td \leq -5$ (до +2 сут.). Расшифровка: ожидается сохранение гололеда до 2 сут без существенного выпадения снега и таяния по температурным порогам дня, ночи (td , tn)
5	Гололед скрытый. Условия: после кодов 1, 3 лег снег ≤ 5 см (до +1 сут.). Расшифровка: ожидается, что под выпавшим до 5 см снегом еще сутки остается опасным сформировавшийся гололед, а далее снег слеживается, начинает утаптываться
8	Гололед слабеет. Условия: после кодов 1, 3, 5 лег снег > 5 см (до +2 сут.). Расшифровка: принимается, что под выпавшим более 5 см снегом гололед еще 2 сут. остается местами опасен для скрытого скольжения
9	Гололед тает. Условия: после кодов 1, 3 $tn > 0$, $td > -5$ (до +1 сут.). Расшифровка: принимается, что за сутки с температурой ночью выше 0°C , а солнечным днем выше -5°C гололед почти везде оттаивает до сравнительно безопасного состояния
Гололедица	
2	Гололедица сильная. Условия: жидкие/смешанные осадки + резкий переход через 0°C ($t \leq -10/12$ ч). Расшифровка: принимается, что если после жидких (смешанных) осадков температура за 12 ч опускается ниже -9°C , то формируется сильная (очень опасная) гололедица
4	Гололедица умеренная. Условия: жидкие/смешанные осадки + постепенный переход через 0°C ($t < -7/24$ ч). Расшифровка: принимается, что если после жидких (смешанных) осадков температура за 24 ч опускается ниже -7°C , то формируется умеренная (опасная) гололедица
6	Гололедица местами. Условия: устойчивый снежный покров + оттепель + резкий переход через 0°C ($t \leq -5/12$ ч). Расшифровка: принимается, что после оттепели при устойчивом снежном покрове понижение температуры за 12 ч до -5°C формирует местами опасную гололедицу
7	Гололедица местами – солнце. Условия: устойчивый снежный покров + солнце + $td \geq -5$ + $tn < -5$. Расшифровка: принимается, что после солнечного дня теплее -5°C при устойчивом снежном покрове похолодание ночью ниже -5°C местами формирует опасную гололедицу

Таблица 2

**Частота кодов авторской типизации гололеда и гололедицы
по погодным условиям на территории Урало-Сибирского региона.
Среднегодовые (2014–2017) частоты:
средние по всем станциям и максимумы**

Код – интерпретация	Среднее станций	Максимум станций	Индекс	Метеостанция
1 – гололед (КН-01)	2	44	23912	Ныроб 60.7 56.8 171м Северный Урал
3 – гололед сохраняется	1	24	23912	Ныроб 60.7 56.8 171м Северный Урал
5 – гололед скрытый	0	14	23912	Ныроб 60.7 56.8 171м Северный Урал
8 – гололед слабеет	0	6	23912	Ныроб 60.7 56.8 171м Северный Урал
9 – гололед тает	0	7	23912	Ныроб 60.7 56.8 171м Северный Урал
2 – гололедица сильная	17	157	30961	Оловянная 50.9 115.6 584м Забайкалье
4 – гололедица умеренная	29	175	30961	Оловянная 50.9 115.6 584м Забайкалье
6 – гололедица местами	13	50	23527	Саран-Пауль 64.3 60.9 Ямал
7 – гололедица – солнце	3	15	28144	Верхотурье 58.9 60.8 126м Урал

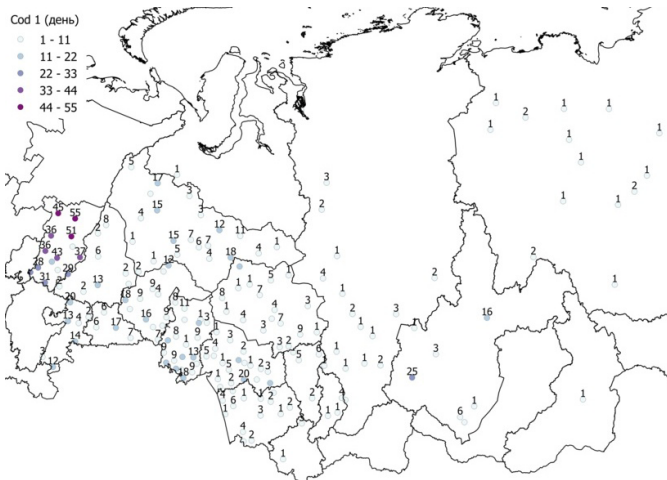


Рис. 1. Распределение частот типов гололеда по метеостанциям за период 2014–2017 гг.: код 1 – дневное время

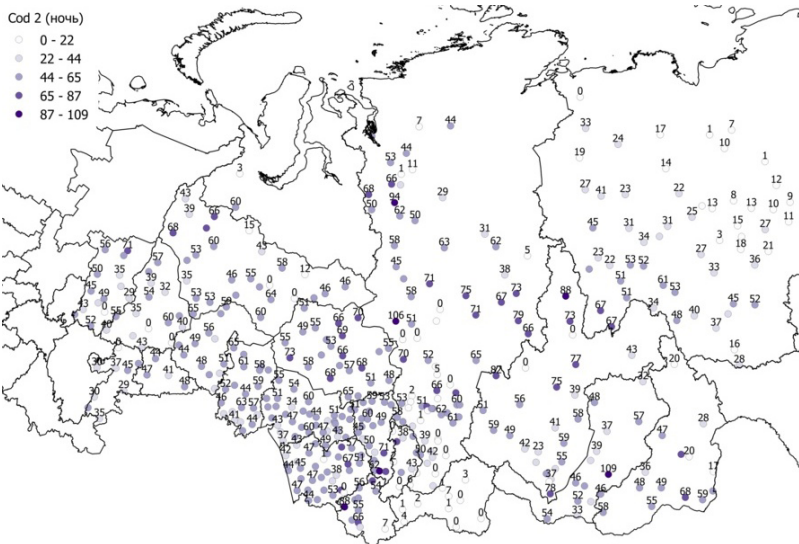


Рис. 2. Распределение частот типов гололедицы по метеостанциям за период 2014–2017 гг.: код 2 – ночное время



Рис. 3. Распределение частот типов гололеда по метеостанциям за период 2014–2017 гг.: код 3 – ночное время

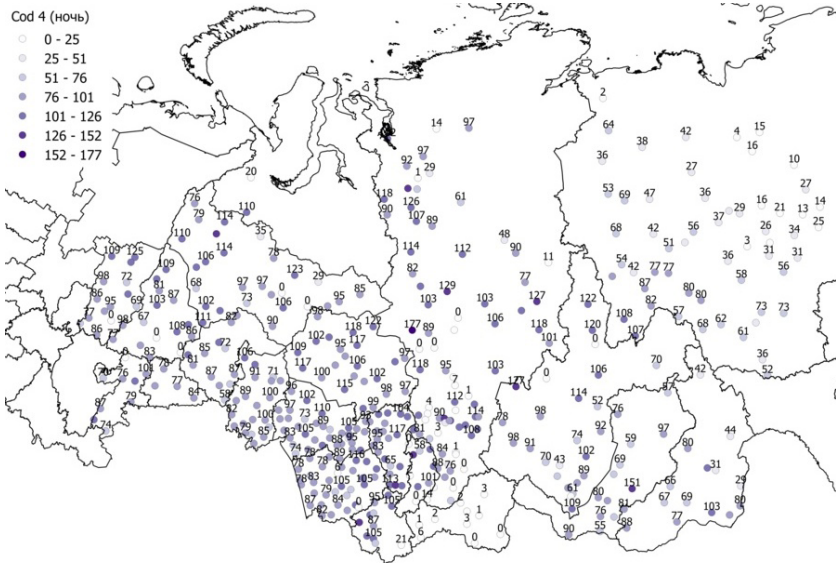


Рис. 4. Распределение частот типов гололедицы по метеостанциям за период 2014–2017 гг.: код 4 – ночное время



Рис. 5. Распределение частот типов гололеда по метеостанциям за период 2014–2017 гг.: код 5 – ночное время

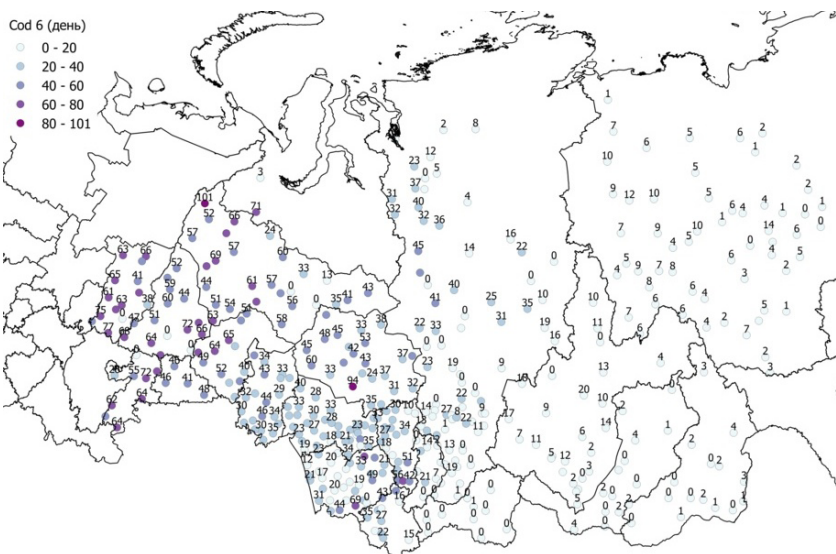


Рис. 6. Распределение частот типов гололедицы по метеостанциям за период 2014–2017 гг.: код 6 – дневное время

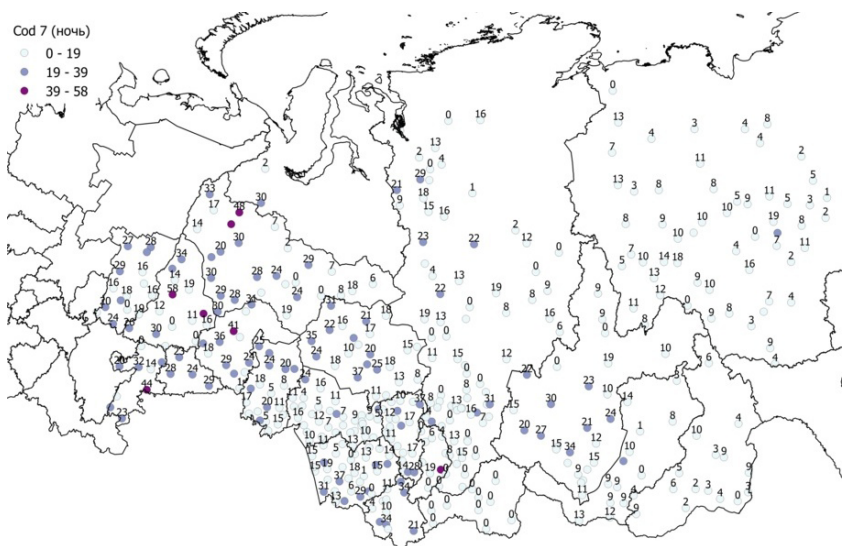


Рис. 7. Распределение частот типов гололедицы по метеостанциям за период 2014–2017 гг.: код 7 – ночное время

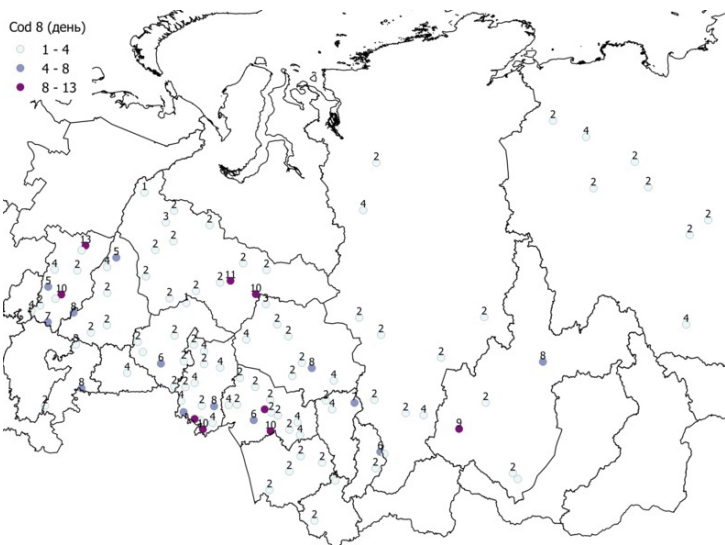


Рис. 8. Распределение частот типов гололеда по метеостанциям за период 2014–2017 гг.: код 8 – дневное время

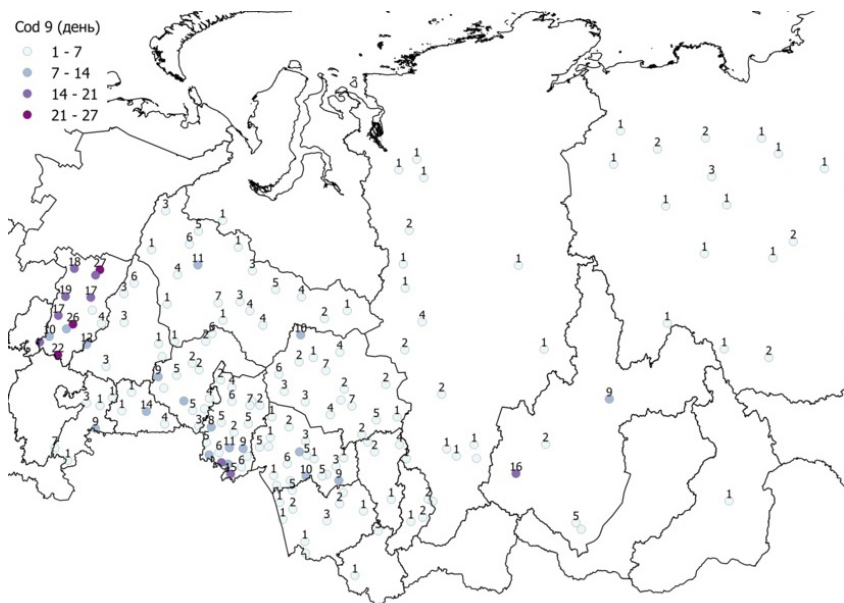


Рис. 9. Распределение частот типов гололеда по метеостанциям за период 2014–2017 гг.: код 9 – дневное время

Таблица 3

Результаты анализа картированных 4-летних частот расширенных кодов гололеда и гололедицы станций Урало-Сибирского региона и Якутии

Код	Гололед	Карта	Анализ 4-летних частот кодов станций на карте
1	Гололед (КН-01)	Рис. 1,	Выше 10 – все Предуралье (день до 55, ночь до 47), редко – Западная Сибирь
3	Гололед сохраняется	Рис. 3,	День 8–24, ночь 20–70 – только Предуралье
5	Гололед скрытый	Рис. 5,	День 4–18, ночь 7–39 – только Предуралье
8	Гололед слабеет	Рис. 8,	Выше 7 (день), 9 (ночь) – только Предуралье, редко – по югу Урала, Сибири
9	Гололед тает	Рис. 9,	Выше 10 (день) – только Предуралье
Код	Гололедица	Карта	Анализ 4-летних частот кодов станций на карте
2	Гололедица сильная	Рис. 2,	Ночь выше 50 – от Урала до юга Якутии, от Горного Алтая, Бурятии до Путорана
4	Гололедица умеренная	Рис. 4,	День выше 50 – юг Сибири, Якутии; ночь выше 80 – Урал, Сибирь, Якутия
6	Гололедица местами	Рис. 6,	Выше 40 (день), 50 (ночь) – Урал, местами Западная Сибирь
7	Гололедица местами – солнце	Рис. 7,	Ночь выше 30 – местами Урал, Западная Сибирь

предупреждения, но основная масса статистических исследований посвящена, напротив, большим, однородным и желателно нормально распределенным характеристикам. К тому же нормативные документы и отсутствие опыта потребителей метеоинформации пока не позволяют использовать вероятностные формулировки прогнозов, которые адекватны природе пространственно-временной изменчивости метеорологических характеристик, условий и явлений погоды. В этом случае детерминированные оценки принято сопровождать формальными дополнениями вида «временами, местами», и каждый потребитель волен трактовать эти скрытые вероятности по своему усмотрению.

Не меньшие сложности это создает и при разработке методов прогнозов, и при их оценке. Очевидно также, что при неравнозначности потенциальных потерь от пропущенного опасного явления и ложного предупреждения методики вынужденно должны подстраиваться в сторону большей предупрежденности и мириться с низкой оправдываемостью прогнозов с явлениями. Для редких ситуаций и явлений асимметрия оценок еще больше, а статистическая обеспеченность прогностических связей еще меньше.

2. О построении логических решающих правил на базе бинарных деревьев

Для бинарного варианта прогноза есть смысл применить процедуру распознавания образов. В нашем случае в качестве базового использован модифицированный вариант алгоритма DW [1], опыт работы с которым имеется в нескольких разработках СибНИГМИ [2, 3].

Алгоритм построен на последовательном делении исходной выборки, содержащей архивные данные двух классов (образов) – с прогнозируемыми явлениями (1-й образ) и без них (2-й образ). Доля случаев с явлениями в исходной выборке принимается за безусловную («климатическую») оценку вероятности 1-го образа. Связь частот (вероятностей) с каким-либо синхронным признаком определяется разделительностью условных распределений двух образов. Параметрические методы распознавания используют сравнения статистических оценок (средние, дисперсии). Алгоритм DW непараметрический и ищет условие разделения выборки среди всех значений вариационного ряда признака.

Отметим, что все авторские варианты алгоритма DW используют удобную бинарную форму – «матрицу сопряженности» (табл. 4), из которой в метеорологии получают различные оценки бинарных прогнозов (2.1–2.9). В алгоритме DW для каждого значения признака как порогового (сравнение на « \leq » или « $>$ » порога) для разделения выборки суммируются счетчики клеток матрицы сопряженности в логичном предположении, что полученная подвыборка с большей вероятностью 1-го образа содержит «прогнозы с явлением», а другая – «прогнозы без явления».

Оценки успешности для альтернативных прогнозов согласно табл. 4:

$pr1 = k11/k01$ – предупрежденность наличия явления (2.1),

$pr2 = k22/k02$ – предупрежденность отсутствия явления (2.2),

$vr1 = k11/k10$ – оправдываемость прогнозов наличия явления (2.3),

$vr2 = k11/k10$ – оправдываемость прогнозов отсутствия явления (2.4),

$vr = (k11 + k22)/k00$ – общая оправдываемость прогнозов (2.5),

$LT = k12/k10$ – доля ложных предупреждений (тревог) (2.6),

$TSS = k11/k01 - k12/k02$ – критерий Пирси–Обухова (2.7).

Таблица 4

Таблица сопряженности прогноз – факт

Прогноз	Факт		Сумма
	Да	Нет	
Да	k11	k12	k10
Нет	k21	k22	k20
Сумма	k01	k02	k00

Авторские критерии: PRV и MPR

$$PRV = 0.5(pr1 + vr1) - 0.2(pr1 - vr1), \text{ если } pr1 \geq vr1,$$

$PRV = 0.5(pr1 + vr1) - 0.4(vr1 - pr1)$, если $pr1 < vr1$ – критерий баланса (2.8).

PRV-критерий построен с целью сбалансировать две разнонаправленные традиционные характеристики матрицы сопряженности: предупрежденности явления $pr1$ (2.1) и оправдываемости прогнозов наличия явления $vr1$ (2.3).

$vr1$ фактически отражает прогностическую вероятность явления, так мы ее и будем называть. PRV из 2.8 можно было представить в расчетном виде:

$$PRV(pr1 \geq vr1) = 0.3pr1 + 0.2vr1 \text{ и } PRV(pr1 < vr1) = 0.9pr1 + 0.6vr1,$$

но тогда не виден смысл весовых коэффициентов, а он заключается в балансировке относительно арифметического среднего $pr1$ и $vr1$.

Принимая априори лучшим вариантом равенство предупрежденности и прогностической вероятности ($PRV = pr1 = vr1$), вычитаем отклонение их от равенства с настраиваемым весовым коэффициентом от среднего. Несимметричные веса дают некоторый приоритет (сдвиг) выбранному параметру ($pr1$ или $vr1$).

$MPR = \max \{ \min(pr1, pr2) \}$ – критерий максимизации минимальной предупрежденности (2.9).

Еще один критерий MPR(2.9) был использован также для варианта балансировки большого климатического размаха между данными разных годов. Это максиминный критерий, его максимизация не допустит слишком большого проседания оценок на разных оценочных выборках, правда, за счет некоторого снижения общей (суммарной) оценки.

Осталось свести матрицу сопряженности к какому-то одночисловому критерию качества разделения для простой максимизации. Авторами ранее уже был выбран критерий Пирси–Обухова как приемлемый именно для сравнения разделенных подвыборок, поскольку эксперименты с различными метеорологическими данными показали хорошее взвешенное разнесение вероятностей при максимизации данного критерия.

Итак, на первом шаге алгоритм сначала находит для заданного признака лучшее по критерию Пирси–Обухова пороговое значение для разделения выборки на две с взвешенным разнесением исходной вероятности 1-го образа на большую («прогнозы с явлением») и меньшую («прогнозы без явления»). Полученный результат уже является готовой мини-методикой прогноза по единственному априори заданному признаку. Далее та же процедура повторяется для каждого проверяемого признака с одновременным отбором признака с максимальным значением критерия Пирси–Обухова.

В итоге на первом шаге алгоритма выбран лучший признак из списка с лучшим для него порогом разделения исходной выборки и получены две подвыборки с большей и меньшей вероятностями 1-го образа относительно исходной. Как показал наш опыт при разработке прогнозов гроз, даже такой на вид простой результат может оказаться «лучшим» для очень редких явлений по одному пункту (1–2 случая за 4 года). Понятно, что обеспеченность такой статистики очень низка и нужно менять подход к формированию выборки.

Второй шаг алгоритма повторяет первый два раза – для каждой из двух полученных подвыборок. Последующие шаги выполняются аналогично с удвоением количества обрабатываемых подвыборок.

Таким образом, получаем бинарное дерево цепочек логических выводов вида «если... то... иначе...» с различными вероятностями явления в каждом узле дерева. Деление каждой ветви может заканчиваться по исчерпанию одного из образов, но разумнее предусмотреть критерий останова раньше. Надо хорошо понимать, что с уменьшением объема делимых подвыборок снижается статистическая надежность, устойчивость получаемых результатов вплоть до случайных совпадений.

В принципе, в таком виде «деревом решений» можно пользоваться для выдачи прогнозов в вероятностной форме, поскольку каждый конечный узел имеет вероятность явления, но, чтобы перейти к бинарной формулировке, надо определить вероятностный порог для отнесения прогноза к 1-му или 2-му образу. Один из простых вариантов – сравнивать с начальной «климатической» вероятностью. А далее объединить все матрицы сопряженности конечных парных веток в одну согласно выбранному порогу. При этом вполне могут найтись лишние деления, поскольку они для этого порога дают совпадающие образы, хотя и с различной вероятностью. В любом случае полученная суммарная матрица сопряженности даст оценку качества прогнозов на этой обучающей выборке с заданным вероятностным порогом отнесения любого сочетания используемых признаков к одному из образов.

Кажется очевидным, что оценивать суммарную матрицу сопряженности можно тем же критерием, что и при делении ветвей, но эксперименты с глубокими деревьями показали, что это не лучший вариант.

Существенная авторская модификация алгоритма предусматривает еще 2 шага алгоритма для оптимизации «глубины» дерева, т. е. числа делений каждой ветви и автоматического выбора пороговой вероятности. Для этого вместо произвольного задания глубины и вероятностного порога предложена следующая процедура.

Для каждой глубины дерева, начиная с максимальной, вычисляются матрицы сопряженности для всех вероятностей из конечных ветвей, используя их как пороговые. В результате максимизации критерия находим

как лучшие пороги для каждого варианта глубины дерева, так и лучший вариант его глубины. Вот именно такое детальное сравнение суммарных матриц сопряженности и соответствующих им критериев натолкнуло на необходимость использования критериев, отличных по свойствам от критерия Пирси–Обухова. Первым был вариант с предложенным критерием PRV (баланс предупрежденности и прогностической вероятности явления) (2.8) [2, 3], а позже – критерий минимальной предупрежденности двух образов MPR (2.9). Оба использовались для сравнения различных вариантов построения прогностических решений, выбора лучших для последующей селекции на независимой выборке и оценки оперативных испытаний методик прогнозов.

3. Методология получения комплекса решающих правил и выбора оптимального

Описанный выше модифицированный алгоритм DW на выходе получает субоптимальное (оптимальное потребовало бы перебора всех возможных сочетаний признаков, что неприемлемо) последовательное решение одновременно и для пороговых вероятностей, и для глубины дерева, формализуя субъективные правила останова.

Решение единственно, что для математика – идеальный законченный вариант. А для целей прогноза – это плохо. Важно понимать – почему?

В метеорологии давно принято считать очевидным методологическое правило: после получения статистического (обычно прогностического) решения на некоторой многолетней архивной выборке проверять его на другой, независимой. Это делается для оценки достоверности и устойчивости найденных статистических связей, которые могут быть и вовсе случайными. Оценки на независимой выборке ожидаемо снижаются, и остается лишь оценить их приемлемость для оперативной работы. Но не стоит думать, что математика об этом «не знала».

Изящное обоснование проблем познания дала знаменитая теорема Геделя о неполноте. Из нее, в частности, следует, что выводы, полученные в замкнутой системе, не обязательно справедливы за ее пределами. А ведь ограниченная выборка данных – это и есть наша «замкнутая система». Конечно, и без Геделя было понятно, что оценочные (полученные на ограниченной выборке) статистические связи – это не законы природы, и сила статистики резко слабеет при невыполнении многих оговоренных в ее основах условий: однородности, эргодичности, нормальности и прочего, что обеспечивает строгость ее выводов. Но с Геделем комфортнее.

Можно понять математиков, которые развивают математический аппарат, оперируя модельными данными с заданными свойствами. Так, если выборка данных внутренне неоднородна, то ее надо оценить, описать

математически, отфильтровать и прогнозировать отдельно, как, например, тренд временного ряда. А поскольку в метеорологии мы имеем дело с данными «природы», а не заданного эксперимента, то приходится решать дилемму: или подбирать/разрабатывать адекватный «грязным» данным алгоритм, или подготавливать особым образом данные для применимости выбранного алгоритма. Оба подхода имеют свои преимущества и недостатки, но ничто не запрещает их комплексировать для получения максимального результата.

Примером такого комплексного подхода служат алгоритмические исследования, связанные аббревиатурой МГУА (метод группового учета аргументов) [4]. В обоснование предложенных подходов к обработке данных и прогнозированию положены два принципа: «внешнего дополнения» (явный отклик на теорему Геделя) и «свободы выбора» Габора. Первый принцип относится к формированию данных, а конкретно к делению выборки на части с применением к каждой различных алгоритмов, а второй дает механизм «селекции, самоорганизации», позаимствованный из «древа жизни». Вот такой любопытный алгоритмический комплекс.

Еще один, более близкий по времени и тематике, пример – моделирование ансамблей в оперативных гидродинамических моделях. Здесь подход несколько иной, но близок в главном – вариации входных данных имитируют различающиеся выборки («внешнее дополнение»), а соответствующее им множество выходных решений позволяет выбрать наиболее вероятное («свобода выбора», селекция).

Аналогичные подходы использованы нами для алгоритмического расширения методики построения логических решающих правил для прогнозирования.

Использовались три выборки многолетнего архива: 2014–2017, 2018, и 2019 гг.

Первая, 4-летняя – для построения базовых деревьев решений глубиной от 1 до 5 уровней для различной полноты списков (9 вариантов) входных параметров. Для последующей селекции по критерию MPR из полученной матрицы (5×9) решений отбирались 9 лучших – матрица (3×3). Вторая (2018 г.) – для селекции лучшего решения по критерию MPR из матрицы решений (3×3). Третья (2019 г.) – для независимой оценки полученных решений.

Алгоритм получения редуцированных списков входных параметров состоял из последовательных шагов построения деревьев, начиная с полного начального списка – 35 прогностических модельных параметров. Для каждого последующего шага список сокращался исключением наименее часто попадавших в деревья параметров с учетом весов, обратно пропорциональных глубинам дерева, на которых признак включался базовым алгоритмом DW. Число одновременных сокращений количества параметров уменьшалось примерно пропорционально текущим размерам спис-

ка от 5–7 на первом шаге до 1 на последнем. Таким образом было получено 9 частотных списков входных параметров.

Алгоритм получения редуцированных деревьев различной глубины (сложности) построен на последовательном обходе узлов выходных деревьев, полученных базовым алгоритмом DW, по уровням глубины, начиная с максимального, и пересчете суммарной матрицы сопряженности для редуцированного на единицу глубины дерева.

Таким образом получено 5 вариантов деревьев решений различной глубины (сложности).

В результате получилась матрица (5×9) вариантов деревьев решений, из которых по критерию MPR отбирались (3×3) лучших и подавались на вход селекции на независимой выборке для получения единственного решения по максимуму MPR.

Описанная иерархическая структура алгоритма направлена на повышение устойчивости решений за счет исключения случайных или редких связей факторов с предиктантом и механизма сбалансированного критерияльного упрощения решений.

Кроме алгоритмических механизмов на различных этапах исследований и вычислительных экспериментов, менялись подходы к формированию входных выборок предикторов и предиктанта. Это определялось как частотными различиями (климат предиктантов (гололед оказался самым редким из исследуемых явлений), так и надежностью получаемых связей. Поэтому деревья решений строились и по отдельным станциям, и по кластерам с радиусом 200 км, и по территории региона в целом.

Различные подходы к формированию выборки, адекватной особенностям предиктанта, зачастую дают гораздо больше, чем самые навороченные алгоритмические ухищрения. Что и подтверждалось всегда в наших исследованиях.

Литература

1. *Манохин А.Н.* Алгоритм DW для распознавания образов: Пакет прикладных программ ОТЭКС. Новосибирск: Изд-во Новосибирского государственного университета, 1981. С. 3–30.
2. *Здерева М.Я., Токарев В.М.* Анализ и прогноз условий погоды, влияющих на концентрацию атмосферных примесей мегаполиса // Труды СибНИГМИ. 2011. Вып. 106. С. 152–158.
3. *Здерева М.Я., Токарев В.М., Хлущина Н.А., Воробьева Л.П., Бабошина Н.А.* Оперативная технология прогноза гроз в Сибири и результаты ее испытаний // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2018. № 2 (368). С. 27–43.
4. *Ивахненко А.Г., Юрачковский Ю.П.* Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. М.: Радио и связь, 1987. 120 с.

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СРЕДНЕМЕСЯЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И МЕСЯЧНЫХ СУММ ОСАДКОВ НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ С ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТЬЮ ДО ОДНОГО ГОДА

Н.Н. Завалишин, А.В. Игнатов, Е.Г. Бочкарева, Н.В. Пальчикова

*ФГБУ «Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт», Новосибирск*

Проверено множество гипотез о стохастических зависимостях среднемесячной приземной температуры воздуха и месячных сумм осадков текущего года на метеостанциях Западной Сибири от предыдущих совместных значений этих же характеристик и параметров, индицирующих факторы внешнего воздействия на Землю из космоса. По отдельности проанализированы низкочастотная и высокочастотная составляющие межгодовой изменчивости рассматриваемых метеорологических переменных. Построены модели их совместной изменчивости. Статистически значимые свойства, которые можно использовать при составлении долгосрочного метеорологического прогноза, подтверждены только в поведении низкочастотных составляющих изменчивости более агрегированных в пространстве и времени характеристик температуры и осадков по сравнению с их ежемесячными показателями на отдельных станциях. Для высокочастотных компонент отмечена слабость их связей с рассматриваемыми в работе предикторами.

Ключевые слова: прогноз, температура, осадки, месяц, Западная Сибирь.

ANALYSIS OF THE POSSIBILITIES OF FORECASTING THE AVERAGE MONTHLY AIR TEMPERATURE AND MONTHLY PRECIPITATION AMOUNTS ON THE TERRITORY OF WESTERN SIBERIA WITH A LEAD TIME OF UP TO ONE YEAR

N.N. Zavalishin, A.V. Ignatov, E.G. Bochkaryova, N.V. Palchikova

Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute, Novosibirsk

Many hypotheses on stochastic dependences between monthly average surface air temperature and monthly precipitation amounts observed at meteorological stations in Western Siberia in the current year and previous joint values of the same characteristics and parameters indicating factors of external influence on the Earth

from space have been tested. The low-frequency and high-frequency components of the interannual variability of the considered meteorological variables are analyzed separately. Models of their joint variability are built. Statistically significant properties that can be used in long-term meteorological forecasting are confirmed only in the behavior of low-frequency components of variability of more aggregated in space and time characteristics of temperature and precipitation as compared with their monthly indicators at individual stations. For high-frequency components, the weakness of their connections with the predictors considered in the study is noted.

Key words: *forecast, temperature, precipitation, month, Western Siberia.*

Введение

Проблема качества долгосрочных метеорологических прогнозов (ДМП), то есть прогнозов с заблаговременностью от месяца до двух лет, касается многих отраслей экономики: сельского хозяйства, энергетики, транспорта, строительства и др. Успешность таких прогнозов для этих отраслей может заметно повысить их экономическую эффективность. Обычно в задачах долгосрочного метеорологического прогнозирования оценивают некоторые усредненные по пространству и времени характеристики температуры воздуха и количества осадков. Успешность подобных прогнозов по совокупности используемых критериев можно в среднем характеризовать так: из трех долгосрочных прогнозов оправдываются два. Более детально о формах представления ДМП и критериях их качества можно ознакомиться в статье [1].

Несмотря на заметное развитие в последнее время технологий прогнозирования, основанных в первую очередь на моделировании динамических процессов в атмосфере [2–4], позволившем заметно продвинуться в улучшении прогнозов погоды, существенно повысить точность ДМП пока не удастся. Поэтому на фоне накопления новых данных о моделируемой системе развиваются и уточняются динамические модели, включающие в себя и океанические процессы, формируются ансамбли прогнозов, а также проводятся различные статистические исследования, ориентированные на выявление каких-либо не учитываемых ранее, но существенных для уточнения ДМП закономерностей динамики атмосферы. Настоящую работу, в которой на конкретных данных проверяется ряд гипотез о закономерностях межгодовой изменчивости температуры и осадков на территории Западной Сибири, скорее всего, следует отнести к статистическим исследованиям. Но, с другой стороны, использование специальной компьютерной технологии [5], позволяющей строить различные, в том числе и весьма сложные, стохастические модели связей прогнозируемых характеристик между собой и с их возможными физическими предикторами, дает возможность рассматривать ее и как одно из

направлений развития физико-статистических моделей, предназначенных для составления ДМП. Работа является естественным продолжением предыдущих исследований авторов [6–8], касающихся задач долгосрочного прогнозирования гидрометеорологических характеристик. В частности, авторы ориентируются на достигнутые показатели качества ДМП за период 2013–2022 гг., равные $\rho = 0,14$; $\Delta T = 56,4$; $P_R = 59,7$ в месячном разрешении по Западной Сибири.

Использованные материалы и методы

В группу выбранных для прогнозирования переменных в нашем случае включены заданные средними месячными значениями температуры воздуха и суммы осадков на различных метеостанциях, расположенных на территории Западной Сибири. В перечень этих метеостанций вошли 30 пунктов наблюдений за температурой и 31 пункт наблюдения за осадками. Предшествующие периоду, на который составляется прогноз, значения этих же переменных рассматриваются в качестве значений возможных предикторов для каждой прогнозируемой характеристики. Также в качестве возможных предикторов в список используемых переменных добавлены параметры, отражающие изменчивость внешнего гравитационного, электромагнитного и корпускулярного воздействий на Землю. Основанием для этого является предположение, что межгодовая изменчивость прогнозируемых характеристик частично формируется под воздействием названных факторов. В качестве индикаторов интенсивности их воздействия были выбраны характеристики, определяющие положение в пространстве Луны, четырех планет солнечной системы (Венера, Марс, Юпитер, Сатурн), а также числа Вольфа.

Для решения задачи первоначально был сформирован массив ретроспективных данных об оценках месячных значений выбранных для прогнозирования переменных и их возможных предикторов с годовым шагом по времени. При такой структуризации используемых сведений одни и те же физические параметры в разные месяцы года рассматриваются как значения 12 различных характеристик, называемых далее месячными переменными. Сезонная изменчивость физических переменных в каждом отдельном ряду таких характеристик отсутствует. Остается только межгодовая изменчивость, закономерности которой как раз и необходимо выявить, чтобы попытаться решить поставленную задачу. Таким образом, полное число месячных метеорологических переменных в исходных данных составило 732 наименования, а число дополнительных месячных предикторов, которые предположительно могут индицировать воздействие на метеорологические процессы космических факторов, составило 276 наименований.

Большая часть сведений о значениях перечисленных выше характеристик была взята из баз данных системы «Кассандра-Сибирь» [9]. Другая часть материалов о значениях предикторов была получена из открытых источников в интернете. Все временные ряды использованных в работе переменных заканчивались 2021 г. Начальные значения метеорологических рядов имели разную привязку по времени, но относились не ранее чем к 1883 г. Под контрольную выборку, в зависимости от решаемой задачи, отводилось то или иное количество реализаций, относящиеся к правой части сформированных временных рядов.

В качестве основного инструмента, с использованием которого осуществлялся поиск прогностических зависимостей, применялась программа «Стохастическое моделирование» [10, 11]. Эта программа является достаточно мощным средством помощи пользователю при математической формулировке и статистической проверке предположений о неизвестной зависимости прогнозируемых переменных от их предикторов. Такие предположения о возможном характере этой зависимости являются дополнительными гипотетическими данными, которые используются при построении прогностических моделей. Программа «Стохастическое моделирование» также включает в себя модули, предназначенные для построения совместной изменчивости переменных, для расчета и представления искомых прогностических оценок в точечной, интервальной или вероятностной форме.

Предварительный контроль и корректировка исходных данных

Одной из особенностей задач долгосрочного метеорологического прогнозирования является слабость зависимостей предсказываемых характеристик от их предикторов. Поэтому, если такие предикторы априори неизвестны, их поиск является наиболее трудоемкой частью процедуры построения необходимых для решения этих задач моделей. При использовании реальных данных результаты такого поиска часто статистически неустойчивы. Большое значение для повышения их устойчивости имеет исключение существенных ошибок (сбоев) из исходных данных. В связи с этим перед началом исследования весьма полезно осуществить поиск подозрительных на сбой значений переменных. Простейшим приемом такого поиска является нахождение статистически аномальных выбросов в используемых данных. Его выполнение можно считать финальным этапом подготовки к решению задачи или первым этапом ее выполнения. В нашем случае для реализации этого приема по оценкам значений каждой из переменных были построены гистограммы их распределений. Выделение аномалий производилось путем сравнения отдельных значений пе-

ременных с параметрами соответствующих гистограмм. Эта работа выполняется программой «Стохастическое моделирование» при загрузке исходных данных из файлов, расположенных на внешних носителях информации, в оперативную память компьютера.

Число выявленных аномальных значений составило: при использовании всей выборки (1883–2021) – 20 выбросов; при использовании сокращенной выборки (1949–2021) – 9 выбросов. После обращения к первоисточникам явно ошибочные аномальные оценки были заменены на правильные значения переменных или исключены из исходных данных. К оставшимся не вызывающим сомнения экстремальным оценкам значений двойственное отношение. С одной стороны, они содержат информацию о редких событиях, что позволяет лучше понимать и, соответственно, моделировать физические механизмы формирования изменчивости значений прогнозируемых характеристик. С другой стороны, наличие таких аномалий усложняет применение статистических методов исследования взаимосвязей между переменными, которое выполняется при поиске необходимых для построения моделей взаимосвязей. В итоге было принято компромиссное решение – для использования в дальнейшей работе мы оставили только выборку данных на отрезке времени с 1949 по 2021 г.

Результаты исследования

Проверка наличия трендов в рядах температуры воздуха и осадков. Рассмотрим сначала самый простой подход к решению задач долгосрочного прогноза рассматриваемых метеорологических переменных. Этот подход основывается на построении и экстраполяции трендов. Такие тренды в рядах средней месячной температуры и суммы осадков на отдельных метеостанциях выявляются. Однако объясняемая их моделями доля изменчивости мала и составляет в использованных данных (даже для температурных рядов, в которых тренды более выражены) не более нескольких процентов от общей межгодовой изменчивости этих переменных.

Пытаясь изменить соотношение низкочастотной и высокочастотной долей изменчивости в анализируемых временных рядах, мы перешли к новым характеристикам, агрегируя несколькими способами первичные данные. При их агрегировании по времени осуществлялся переход от месячных к годовым значениям переменных. При агрегировании по пространству проводилось усреднение месячных данных по всем станциям. Для температуры дополнительно формировались новые переменные, значения которых рассчитывались как линейные комбинации средних температур одного и того же месяца на отдельных станциях. Коэффициенты в таких линейных комбинациях определялись с учетом взаимной корреляции этих переменных. При наивысшей степени агрегирования

годовые характеристики температуры и осадков дополнительно усреднялись по всем станциям. В результате всех примененных способов было сформировано 92 новых переменных, для которых также были построены трендовые модели.

Анализ этих моделей показал, что выполненное агрегирование данных, действительно, улучшает соотношение «сигнал/шум» в прогностических методиках, основывающихся на экстраполяции на очередной год вперед низкочастотной составляющей изменчивости температуры и осадков. При проверке на контрольной выборке (2019–2021) предсказательная способность моделей трендов для агрегированных только по пространству месячных переменных возрастает (по сравнению с прогнозом по среднему значению обучающей выборки) примерно в два раза, для годовых значений – в 4–5 раз, а для годовых значений, усредненных по всем станциям, – в 6–8 раз.

При использовании оценок трендов в качестве прогностических моделей были применены три способа их построения: глобальная линейная аппроксимация всего ряда (ГЛА), локальная кусочно-линейная аппроксимация (ЛЛА) и локальная линейная экстраполяция (ЛЛЭ). В первом случае в качестве тренда подбирается единая линейная функция времени, которая минимизирует остаточную дисперсию на всей обучающей выборке. Во втором случае, начиная с конца обучающей выборки, формируется его кусочно-линейная аппроксимация ряда путем его разбиения на серии лет повышения или понижения локального линейного тренда. Длина серии подбирается в диапазоне от 6 до 30 лет по условию минимизации остаточной дисперсии на каждом линейном участке тренда. В третьем случае определяется масштаб скользящего сглаживания ряда таким образом, чтобы при линейной экстраполяции его локального сглаженного среднего в ближайшую по времени точку модельное предсказание наилучшим образом аппроксимировало каждое соответствующее независимое фактическое значение. Наилучшие прогностические результаты, в среднем по всем вариантам агрегированных переменных, показали модели трендов, построенные по методу ЛЛЭ.

Проверка наличия циклических колебаний в рядах отклонений агрегированных переменных от их трендов. Второй сравнительно простой прием поиска возможных прогностических закономерностей в отдельных временных рядах – это анализ этих рядов на предмет скрытой цикличности, аппроксимирующей более высокочастотную часть их межгодовой изменчивости. Для проверки этой гипотезы мы исключили тренды из рядов агрегированных характеристик и в полученных рядах отклонений с использованием нескольких различных алгоритмов попытались выявить устойчивые или затухающие после внешнего воздействия циклические процессы. Наличие таких циклов совместно с трендами позволило бы

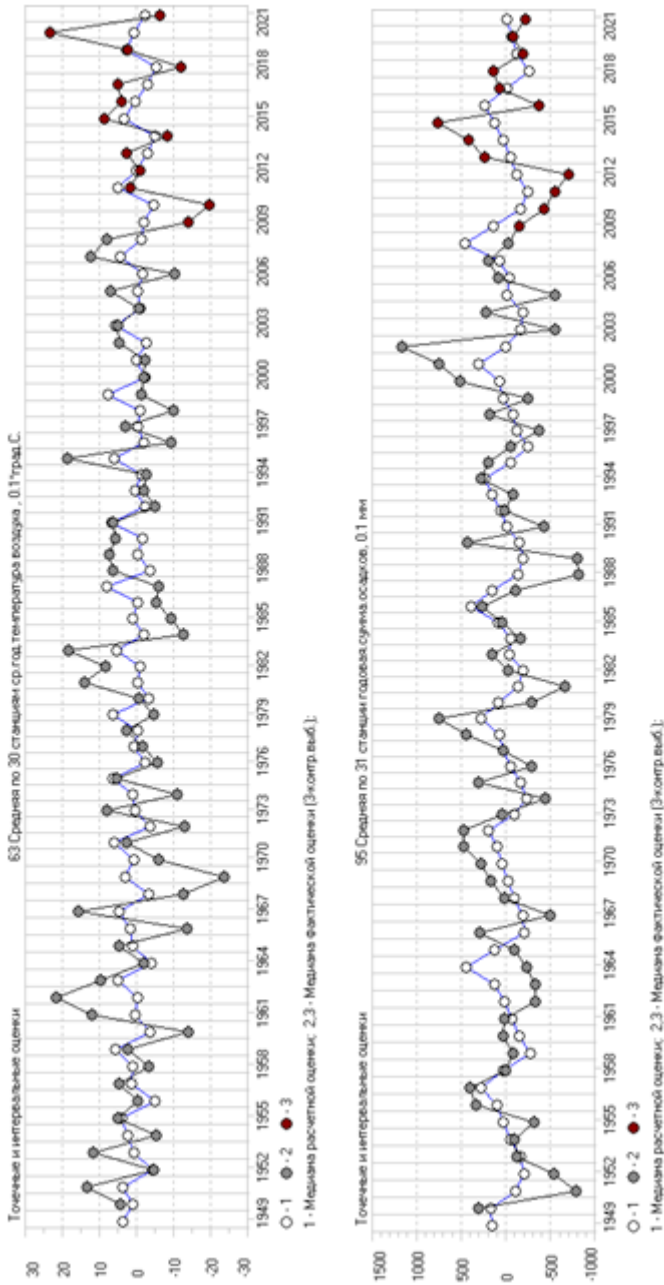


Рис. 1. Аппроксимация циклическими функциями, построенными с использованием только обучающей выборки, рядов отклонений от трендов для осредненных по всем станциям годовых характеристик температур и осадков

улучшить прогностическую экстраполяцию рассматриваемых метеорологических переменных. Увы, но каких-либо статистически значимых колебательных эффектов, пригодных для уточнения прогнозов межгодовой изменчивости исследуемых метеорологических характеристик, обнаружено не было. Примеры аппроксимации и прогнозирования рядов отклонений от наиболее агрегированных переменных с помощью моделей циклических функций приведены на рис. 1.

Модели многофакторных прогностических зависимостей для месячных характеристик температуры и осадков на отдельных метеостанциях. Рассмотрим теперь более сложные и громоздкие подходы к поиску прогностических моделей. Вернемся к исходным метеорологическим переменным и будем строить для каждой из них многофакторную модель зависимости от начальных условий и текущих внешних факторов. В качестве начальных условий используем значения всех контролируемых в нашей задаче метеорологических и космических характеристик в предыдущие три года перед годом, для которого составляется долгосрочный прогноз. В качестве параметров, задающих воздействие текущих факторов, выберем значения космических характеристик, относящиеся к тому же временному интервалу, что и значение прогнозируемой характеристики. Значения таких параметров, индицирующих воздействие космических факторов, в силу свойств их временной изменчивости, могут быть с достаточной точностью рассчитаны с помощью программы «Стохастическое моделирование» или любой другой подходящей технологии и использованы при составлении прогноза температуры и осадков.

При формулировке задачи для всех 732 метеорологических переменных на основе указанных выше начальных условий и факторов внешнего воздействия зададим множество возможных предикторов, и далее для каждой из них будем искать ограниченную по длине комбинацию рекомендуемых предикторов, обеспечивающую наивысшую ожидаемую точность прогноза с требуемой заблаговременностью. Программа «Стохастическое моделирование» допускает такую постановку задачи. Ее решение (за исключением формулировки самой постановки) не предполагает непосредственного участия эксперта, но, с учетом большого числа прогнозируемых переменных и еще большего числа их предполагаемых предикторов, требует относительно больших затрат компьютерного времени. Тем не менее попытка решения задачи в такой ее постановке была сделана, однако она не увенчалась успехом. Построенные с использованием двух разных алгоритмов выбора предикторов многофакторные модели не подтвердили (табл. 1) на контрольных данных сохранение полученного на обучающей выборке решения.

Неустойчивость результата моделирования, в процессе которого для прогнозируемых переменных производится выбор включаемых в модель

Таблица 1

**Усредненные по всем 732 переменным оценки параметров качества
прогностических моделей, построенных с применением
двух разных алгоритмов выбора предикторов**

Обучающая выборка (60 совместных реализаций)			Контрольная выборка (13 совместных реализаций)				
M1	M2	M3	M3к	Sф/Sp	Sф/So	Sф/Sн	Δ
0,04	0,88	0,281	0	1,62	1,34	1,16	0,44
<0,78	0,89	0,34	0	1,6	1,3	1,12	0,45

Обозначения. M1 и M2 – оценки мер доверия, соответственно, к аргументам и оператору регрессии, M3 – оценка меры точности аппроксимации. Все эти три меры определяются в процессе построения модели с подбором предикторов для зависимой переменной. So – стандартное отклонение обучающей выборки; Sф, Sp и Sн – среднеквадратичные отклонения, соответственно, фактической ошибки прогноза, расчетной ожидаемой ошибки прогноза и ошибки прогноза по «норме», т. е. экстраполяции среднего значения обучающей выборки. M3к – мера точности аппроксимации контрольной выборки; Δ – доля прогнозов, оправдавшихся по условию $Sф < 0,67So$.

предикторов из нескольких тысяч возможных претендентов на эту роль при слабости искомым зависимостей, скорее всего, связана со случайностью в выборе их рекомендуемой комбинации. При прямом подборе предикторов из их исходного списка при проверке множества гипотетических комбинаций (алгоритм 1) средняя вероятность правильного выбора оценивается величиной $M1 = 0,04$. При использовании алгоритма 2, в рамках которого выполняются различные операции по повышению этой вероятности, определяется ее верхняя оценка $M1 < 0,78$, но и этот алгоритм не гарантирует правильности выбора предикторов. В такой ситуации для большинства функций на ограниченной обучающей выборке данных подбираются комбинации ложных аргументов, зависимость от которых статистически выглядит более сильной, чем от истинных предикторов прогнозируемых переменных. В результате этого построенные оптимальные по заданному критерию модели не проходят проверку на контрольной выборке.

Если истинная зависимость не очень сильная, но все-таки сильнее большинства ложных вариантов, полезные модели, обладающие предсказательной способностью, могут быть найдены. В пользу этого утверждения можно привести примеры моделей связей между суммами осадков, относящихся к одному и тому же месяцу. Предикторы в таких моделях, при их подборе по алгоритму 2, устойчиво выявляются в рамках примерно такой же постановки задачи их поиска, что и в нашем случае. Предсказательная способность двух таких моделей, отражающих пространственные взаимосвязи между текущими осадками, показана на рис. 2.

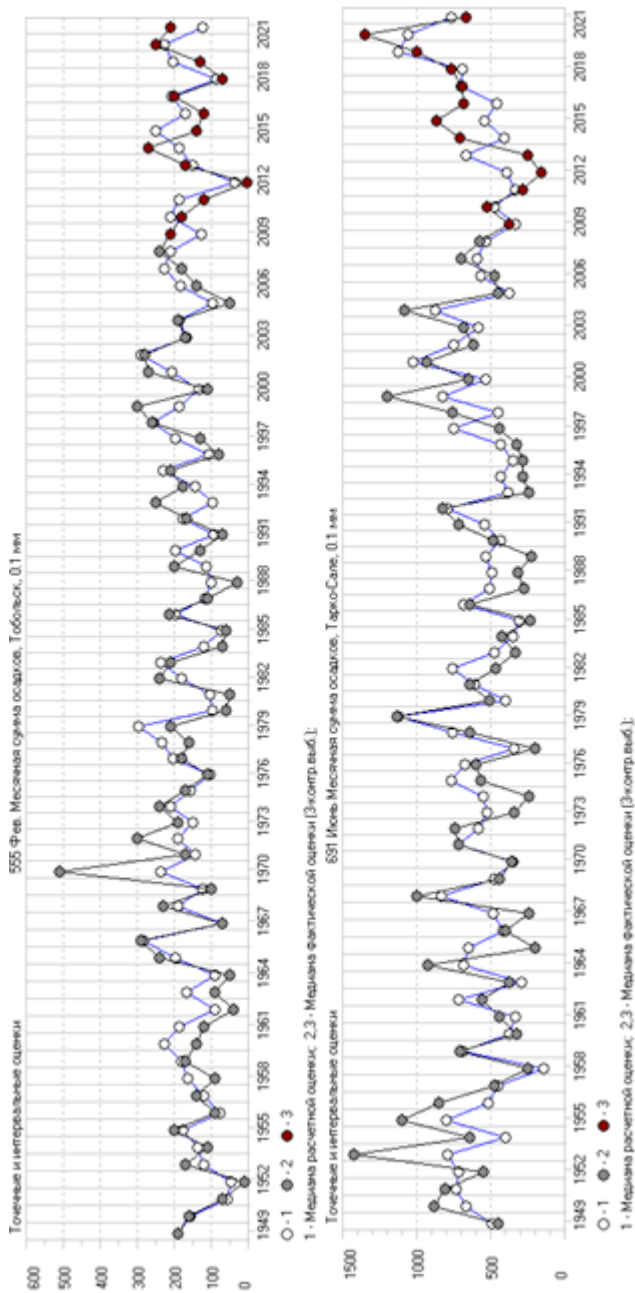


Рис. 2. Примеры выявления и использования для контрольного расчета не очень сильных, но устойчивых во времени связей между месячными суммами осадков

Модели совместной изменчивости температуры и осадков. Вернемся снова к агрегированным метеорологическим характеристикам и попытаемся построить модель их совместной изменчивости. В рамках такой более сложной модели объединяются в систему множество частных (или элементарных) моделей зависимости от предикторов и взаимозависимости между прогнозируемыми характеристиками.

При составлении прогноза по модели совместной изменчивости сначала по известным значениям предикторов вычисляются предварительные прогностические оценки метеорологических переменных. Далее эти оценки используются в качестве приближенно заданных аргументов в моделях взаимосвязи их текущих значений, что позволяет получить вторичные оценки значений прогнозируемых переменных. Наконец, две названные оценки каждой переменной согласуются между собой с учетом их расчетных параметров качества. За счет операции взвешенного усреднения, выполняемого при таком согласовании, точность окончательных оценок прогнозируемых значений переменных может быть повышена. Однако нужно заметить, что из-за существенной погрешности (систематической или случайной) задания предикторов в моделях взаимосвязи между прогнозируемыми характеристиками, математической структуры описываемых ими регрессий и частичной взаимозависимости предварительной и вторичной оценок такое уточнение реализуется не всегда и не для каждой переменной.

Сформируем по описанному алгоритму модель совместной изменчивости и рассчитаем прогностические оценки для агрегированных температур и осадков. При получении первичных оценок используем набор частных моделей трендов, построенных с использованием алгоритма ЛЛЭ. Для расчета вторичных оценок построим модели наиболее сильных взаимосвязей между значениями этих переменных, относящимися к одному и тому же году. Окончательные результаты проверим на контрольной выборке, под которую в данном варианте задачи выделим три года (2019–2021). Параметры, характеризующие ожидаемую и фактическую точность контрольных расчетов, приведены в табл. 2. В первой строке этой таблицы помещены значения параметров качества прогноза, построенного только на основе трендовых ЛЛЭ моделей, во второй строке – аналогичные параметры для модели совместной изменчивости.

Сравнение этих двух строк показывает, что принципиального улучшения прогноза метеорологических характеристик за счет дополнительного учета взаимосвязей между их текущими значениями получить не удалось. По одним критериям качество совместного прогноза оказывается выше, по другим – ниже.

Если построить модель совместной изменчивости и для исходных переменных, т. е. для средних месячных температур и месячных сумм

Таблица 2

**Оценки параметров качества прогноза,
составленного с использованием модели совместной изменчивости
94 агрегированных метеорологических переменных**

Модели, использованные для прогнозирования температуры и осадков	t	Sф/Sп	Sф/Sо	Sф/Sн	Δ	ρ
Тренды (модели ЛЛЭ)	-0,11	1,03	1,02	0,77	0,49	0,21
Модель совместной изменчивости	-0,17	1,37	1,00	0,76	0,51	0,31

Обозначения. t – критерий Стьюдента, характеризующий среднее смещение прогнозов относительно фактических значений; ρ – критерий, характеризующий корреляцию знаков отклонений фактических и прогнозных значений от локальной климатической нормы; остальные обозначение – такие же, что и в табл. 1.

осадков на отдельных станциях, то можно увидеть, что среднее качество прогнозов в этом случае еще меньше и является недостаточным для их практического использования.

Попытка прогнозирования месячных значений температуры и осадков на очередной месяц вперед по моделям их зависимости от внутригодовых значений предикторов. Как показало описанное выше исследование, на основе использованных данных и примененных методов не удастся с заданной заблаговременностью и пространственно-временным разрешением построить модели, позволяющие формировать прогнозы температуры и осадков с практически приемлемой точностью. Достаточно устойчиво и статистически значимо на исследованном временном интервале выделяется только трендовая составляющая изменчивости, причем не для первоначально выбранных месячных метеорологических переменных, а для их более агрегированных по пространству и времени аналогов.

Возможно, на основе тех же самых данных можно строить практически полезные по точности прогнозы рассматриваемых характеристик температуры и осадков с меньшей заблаговременностью? Для проверки этого предположения попытаемся найти в исходных материалах свойства, позволяющие прогнозировать интересующие нас переменные на очередной месяц. При формулировке задачи по поиску таких свойств выберем пробную группу, включающую в себя 70 месячных метеорологических характеристик, относящихся к теплomu сезону года, контролируемых на пяти метеостанциях, расположенных в разных районах Западной Сибири. В качестве значений возможных предикторов для этой группы прогнозируемых переменных назначим значения всех используемых характеристик (метеорологических и космических), имевшие место в предыдущие три месяца по отношению к месяцу, на который составляется прогноз. Далее,

Таблица 3

**Оценки параметров качества моделей прогноза
на очередной месяц вперед на примере 70 месячных переменных,
относящихся к теплоту (апрель–октябрь) времени года**

t	M3	Sф/Sп	Sф/Sо	Sф/Sн	Δ	ρ
0,23	0,14	1,32	1,21	1,1	0,44	0,02

Обозначения такие же, как и в табл. 1 и 2.

на выборке данных за 1949–2008 гг. для каждой из 70 зависимых переменных найдем оптимальную комбинацию рекомендуемых предикторов, построим модели зависимости от них и выполним контрольный прогноз, который проверим на данных за 2009–2021 гг. Ряд параметров, характеризующих результаты этой работы, представлены в табл. 3.

По данным, приведенным в табл. 3, можно судить, что возможные зависимости месячных метеорологических характеристик от запаздывающих на 1–3 месяца предикторов такие же слабые, как и в моделях, ориентированных на прогнозы этих же переменных с большей заблаговременностью. Эти зависимости также устойчиво не выявляются использованными средствами на фоне шумового сигнала. Средний уровень точности аппроксимации обучающей выборки для рассматриваемой группы переменных ($M3 = 0,14$) находится в области флуктуаций этой характеристики, поэтому и выбираемые по статистическим критериям комбинации предикторов для зависимых переменных в большинстве моделей также случайны. По этой причине качество моделей на контрольной выборке не подтверждается и не превышает качества прогноза по локальной норме.

Поиск зависимостей от космических факторов на данных, сформированных в ряды с месячным шагом по времени. Главная физическая гипотеза, использованная в настоящей работе, это предположение о влиянии космических факторов на межгодовую изменчивость температуры и осадков на территории Западной Сибири. Чтобы с большей уверенностью убедиться в наличии или отсутствии такой зависимости, рассмотрим еще одну задачу. При ее подготовке сначала сформируем исходные данные в виде таблицы, в которой значения всех переменных задаются с месячным шагом по времени. В этом случае число контролируемых в задаче характеристик сокращается в 12 раз (с 1008 до 84), а число совместных реализаций переменных увеличивается, соответственно, в это же число раз. Затем исключим из их временных рядов тренд и среднесезонную волну сезонной изменчивости. Эта операция повышает значение отношения искомой, возможно объясняемой космическими факторами, дисперсии к дисперсии суммарной изменчивости этих рядов, что несколько увеличивает чувствительность используемых нами методов поиска

скрытых в данных зависимостей метеорологических переменных от их потенциальных космических предикторов. Далее, для значений рядов отклонений от тренда и среднего сезонного хода для пробной группы семи метеорологических переменных, выбранных случайным образом из всего их списка, проверим гипотезу о возможной зависимости этих семи переменных от предикторов, индицирующих влияние космических факторов.

Поиск оптимальных моделей при описанных выше условиях показал, что, к сожалению, и в этой задаче каких-либо статистически значимых зависимостей для выбранной группы месячных метеорологических переменных от множества использованных космических предикторов обнаружено не было. Случайные связи при обучении моделей на достаточно большой выборке (840 совместных реализаций) эффективно подавлялись, так что даже не было необходимости проверять основанные на них модели на контрольной выборке. Статистическая значимость выводов о наличии или отсутствии такой зависимости в этом случае значительно выше, чем при анализе материалов, заданных с годовым шагом по времени, так как пробные гипотезы проверяются на существенно большем (в 12 раз) числе совместных реализаций, а само количество проверяемых гипотез много меньше. Однако если в разные месяцы года влияние на метеорологические характеристики космических факторов (солнечной активности и гравитации Луны и планет) реализуется по-разному, то данное обстоятельство может в определенной мере маскировать фактически имеющийся эффект такого воздействия. Чтобы попытаться уменьшить такой возможный маскирующий эффект различного проявления космических воздействий в разные сезоны года, в список возможных предикторов добавлялся номер месяца, но и это действие не привело к улучшению результата моделирования.

Заключение

В целях поиска или уточнения методик долгосрочного метеорологического прогноза с использованием многолетних данных о приземной температуре воздуха и суммах осадков на территории Западной Сибири и специализированного программного продукта проверено множество гипотез о возможных закономерностях формирования межгодовой изменчивости этих характеристик. Необходимые для прогноза модели искались в форме стохастических зависимостей среднемесячной приземной температуры воздуха и месячных сумм осадков текущего года на 31 метеостанции от совместных значений этих же переменных в предыдущие несколько лет, а также от параметров, индицирующих изменения электромагнитного, корпускулярного и гравитационного воздействия на Землю из космоса. Дополнительно было проведено аналогичное исследование изменчивости

для более агрегированных (в пространстве и времени) характеристик температуры и осадков. По отдельности анализировались низкочастотная и высокочастотная составляющие межгодовой изменчивости этих переменных. Также были сделаны попытки решения прогностической задачи путем построения модели совместной изменчивости названных метеорологических характеристик.

По итогам выполненной работы можно заключить, что статистически значимые свойства, которые можно использовать при разработке долгосрочного метеорологического прогноза, удалось обнаружить только в поведении низкочастотной составляющей более агрегированных (по сравнению с месячными значениями на отдельных станциях) характеристик температуры и осадков, что можно интерпретировать как изменение климата. Эти свойства лучше всего описываются моделями локальных трендов. Такие модели можно строить без использования каких-либо громоздких и требующих значительных компьютерных ресурсов алгоритмов. Модель простого линейного тренда рекомендуется строить на временном отрезке, начинающемся где-то в середине прошлого века и оканчивающемся моментом составления прогноза. Более сложные модели, для построения которых требуется применение специфических методов, например таких, как использованная в настоящей работе программа «Стохастическое моделирование», могут несколько улучшить прогностические результаты, но это улучшение минимально и статистически значимо не выделяется на фоне самых простых решений.

Попытка использовать более короткие внутригодовые взаимосвязи для предсказания месячной температуры и суммы осадков на очередной месяц по доступным к его началу данным тоже не привела к построению успешных прогностических моделей с такой заблаговременностью. Также не удалось обнаружить какой-либо заметной зависимости температуры и осадков от рассмотренных в работе космических факторов при компоновке данных, позволяющих делать статистически более значимые выводы.

Основной предполагаемой причиной полученного результата работы является слабость искомым прогностическим зависимостям, закономерно ограничивающих высокочастотную часть межгодовой изменчивости рассматриваемых метеорологических переменных. Эта слабость не позволяет выявить истинные генетически обусловленные эффекты на фоне статистически более сильных, но случайных, наблюдающихся на ограниченной обучающей выборке формальных статистических связей между значениями предсказываемых переменных и значениями их ложных предикторов. При планировании дальнейшей работы представляется целесообразным попытаться с использованием инструментов программы «Стохастическое моделирование» отыскать конструктивные для составления ДМП по Сибири зависимости от характеристик океанических вод, состояния ледово-

го покрова и других параметров, которые будут рассматриваться в качестве потенциальных предикторов, как это делается и в динамических моделях общей циркуляции атмосферы.

Литература

1. Вильфанд Р.М., Зарипов Р.Б., Киктев Д.Б., Круглова Е.Н., Крыжов В.Н., Куликова И.А., Тищенко В.А., Толстых М.А., Хан В.М. Долгосрочные метеорологические прогнозы в Гидрометцентре России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 12–36.
2. Мирвис В.М., Мелешко В.П. Современное состояние и перспективы развития метеорологических прогнозов на месяц и сезон // Труды ГГО. 2008. Вып. 558. С. 3–40.
3. Толстых М.А. Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды. М.; Обнинск: ОАО ФОР, 2010. 111 с.
4. Толстых М.А., Желен Ж.Ф., Володин Е.М., Богословский Н.Н., Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Красюк Т.В., Кострыкин С.В., Мизяк В.Г., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Шляева А.В., Эзау И.Н., Юрова А.Ю. Разработка многомасштабной версии глобальной модели атмосферы ПЛАВ // Метеорология и гидрология. 2015. № 6. С. 25–35.
5. Игнатов А.В. Технология «Стохастическое моделирование»: основные положения и их реализация // Труды СибНИГМИ. 2021. Вып. 107. С. 20–29.
6. Завалишин Н.Н. Кусочно-стационарные модели динамики месячных сумм осадков и среднемесячных температур воздуха (Локально-климатическая модель): Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 1995. 16 с.
7. Игнатов А.В., Завалишин Н.Н. Закономерности и модели изменчивости полезного притока в озеро Байкал // География и природ. ресурсы. 2021. Т. 42, № 1. С. 56–64.
8. Завалишин Н.Н., Игнатов А.В., Бочкарева Е.Г., Пальчикова Н.В., Орлова З.С. Опыт долгосрочного прогнозирования гидроэлементов на территории Сибири и смежных регионов // Труды СибНИГМИ. 2021. Вып. 107. С. 43–58.
9. Завалишин Н.Н., Медведева Т.С., Орлова З.С. База данных технологии «Касандра-Сибирь». Свидетельство о государственной регистрации в Реестре баз данных RU 2013620777. Дата регистрации в Реестре баз данных 02.07.2013.
10. Игнатов А.В. Стохастическое моделирование: Версия 02 «Поиск эмпирических закономерностей». Свидетельство о государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ № 2018660076. Дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ 16.08.2018.
11. Игнатов А.В. Руководство пользователя программы «Стохастическое моделирование». Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2019. 217 с.

**О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНДЕКСА
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОЖАЙНОСТИ КАРТОФЕЛЯ
(на примере Иркутской области)**

О.И. Пищимко^{1,2}, Л.В. Гарафутдинова³

¹ФГБУ «Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт», Новосибирск

²ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет»,
Новосибирск

³ФГБУН Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий
Российской академии наук, Новосибирск

Исследовательская работа проведена с целью определить возможности использования дистанционного зондирования для прогнозирования урожайности картофеля по всем категориям хозяйств на территории Иркутской области, что в настоящее время является актуальным и ценным для сельхозтоваропроизводителей ввиду развития цифровых технологий. Ценность исследования заключается в разработке моделей расчета, созданных на основе данных наземной сети станций, и добавления в них индекса дистанционного зондирования зеленой площади листьев LAI. Авторами проведен анализ данных, полученных с наземной сети станций, и многолетнего ряда урожайности картофеля по всем категориям хозяйств. Для включения в модели использован индекс дистанционного зондирования зеленой площади листьев, определяемый по многозональным космическим изображениям. Для расчета индекса LAI получены данные с космического спутника Landsat-8. При расчете физико-статистических моделей взят многолетний ряд урожайности картофеля по всем категориям хозяйств. В модели включены основные лимитирующие урожайность факторы, а также комплексные показатели в сочетании с данными дистанционного зондирования Земли, были получены новые экспериментальные модели с достаточно высокой оправдываемостью. Полученные модели позволят, основываясь на агрометеорологических условиях, фактическом состоянии растений и спутниковых данных, осуществлять заблаговременный прогноз урожайности картофеля по всем категориям хозяйств в принятые в Росгидромете сроки.

Ключевые слова: агрометеорологические наблюдения, модель прогноза урожайности, LAI, картофель, Иркутская область.

USE OF REMOTE SENSING TO FORECAST POTATO YIELD (on the example of the Irkutsk region)

O.I. Pishchimko^{1,2}, L.V. Garafutdinova³

¹*Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute, Novosibirsk*

²*Novosibirsk State Agrarian University, Novosibirsk*

³*Siberian Federal Scientific Centre of AgroBioTechnologies
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk*

The research work was carried out in order to determine the possibility of using remote sensing to predict the yield of potatoes for all categories of farms in the Irkutsk region, which is currently relevant and valuable for agricultural producers in view of the development of digital technologies. The value of the study lies in the development of calculation models based on the data of the ground network of stations and the addition of the remote sensing leaf green area index (LAI) to them. The authors analyzed the data obtained from the ground network of stations and the long-term series of potato yields for all categories of farms. For inclusion in the model, the remote sensing index of the green area of leaves, determined from multi-zone satellite images, was used. To calculate the LAI, data were obtained from the Landsat-8 space satellite. When calculating physical and statistical models, a long-term series of potato yields for all categories of farms was taken. The models include the main yield-limiting factors, as well as complex indicators in combination with Earth remote sensing data; new experimental models were obtained with a fairly high justification. The resulting models will allow, based on agrometeorological conditions, the actual state of plants and satellite data, to issue an early forecast of potato yields for all categories of farms within the time limits adopted by Roshydromet.

Key words: *agrometeorological observations, yield forecast model, LAI, potato, Irkutsk region.*

Моделирование урожайности сельскохозяйственных культур оказывает влияние на отрасль сельского хозяйства, которая является стратегической для Российской Федерации. Своевременный, качественный, учитывающий интенсификацию отрасли агрометеорологический прогноз урожайности сельскохозяйственных культур способен оказать влияние на производственный процесс и принятие экономических решений, от которых зависит продовольственная безопасность исследуемой территории.

Климат на территории Иркутской области умеренный, резко континентальный, обусловлен географическим положением. Зимний период затяжной, отличается сухостью и значительными понижениями температур. Изменчивость погодных условий приводит к существенным колебаниям урожайности сельскохозяйственных культур по годам. Ценным продовольственным растением, возделываемым на территории исследуемой

области, является картофель (*Solanum tuberosum L.*), который относится к семейству пасленовых (*Solanaceae*). Картофель используется в пищевой промышленности и кормопроизводстве. Для прогнозирования урожайности картофеля в агрометеорологической практике применяют данные с сети наземных станций [1–3]. Ранее одним из авторов были разработаны методы прогноза урожайности картофеля, которые успешно прошли оперативные испытания. Решением технического совета ФГБУ «Иркутское УГМС» от 20 апреля 2023 г., одобренным решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета от 29 мая 2023 г., автоматизированный метод прогноза урожайности картофеля по сельхозпредприятиям и по всем категориям хозяйств Иркутской области (ФГБУ «СибНИГМИ», О.И. Пищимко) с 1 августа 2023 г. внедрен в качестве основного расчетного метода. В продолжение исследования в сотрудничестве со СФНЦА РАН были разработаны экспериментальные модели с включением спутниковой информации. Ведь все чаще в работах авторов при прогнозе урожайности используют индексы дистанционного зондирования, которые, по их мнению, имеют значимую связь с многолетней динамикой урожайности [4–6]. Использование дистанционного зондирования в сельскохозяйственном секторе существенно расширило возможности мониторинга роста сельскохозяйственных культур и оценки характеристик параметров растительности, таких как индекс листовой поверхности (LAI) [7]. Также данные, полученные при помощи дистанционного зондирования, позволяют четко понимать состояние роста культур, что в дальнейшем дает возможность принимать решения по стратегическому управлению сельскохозяйственными полями и, таким образом, устойчиво повышать урожайность. В этой работе использован LAI, на основе которого проводят мониторинг состояния культур и прогнозируют урожайность. LAI выступает как один из определяющих жизненный цикл и структуру растительного покрова параметр, связанный с фотосинтезом, дыханием и транспирацией [8].

Цель данного исследования состоит в определении возможности использования дистанционного зондирования для прогнозирования урожайности картофеля по всем категориям хозяйств на территории Иркутской области.

Методика

На начальном этапе происходит анализ территории, условий роста и формирования урожая. Определяются главные факторы климата, среда обитания растений и культура земледелия исследуемого региона. Затем составляется предварительный список лимитирующих факторов, из которых формируются базы данных. При помощи баз данных рассчитываются

корреляционные матрицы, отражающие зависимость факторов между собой и урожайностью сельскохозяйственных культур.

При анализе матриц необходимо принимать во внимание следующее:

1) они должны быть значимы с учетом объема выборки и точности измерения;

2) они должны быть, по возможности, слабо коррелированы между собой или вовсе независимы.

Для создания физико-статистических моделей в исследовании использовались данные наземной сети станций за период с 1981 по 2016 г. Данные наземной сети станций предоставлены отделом агрометеорологических прогнозов и агрометеорологии ФГБУ «Иркутское УГМС», выборка проведена из агрометеорологических ежегодников. Выделены 20 репрезентативно расположенных станций, наиболее полно отражающих агрометеорологические условия исследуемой области. Проанализированы показатели температуры, осадков, дефицита насыщения воздуха. Проведен расчет и анализ комплексных величин [9]. Отобраны факторы, оказывающие наиболее значимое влияние на процесс формирования урожайности картофеля по всем категориям хозяйств Иркутской области. Расчеты LAI были сделаны в лаборатории агроклиматических исследований СФНЦА РАН. Проведен расчет значений LAI, полученного посредством обработки снимков дистанционного зондирования Земли со спутникового аппарата Landsat-8. Космические снимки скачаны с сайта Геологической службы США (<https://earthexplorer.usgs.gov>), снимки находятся в свободном доступе. Границы рабочих участков для расчета LAI определяли при помощи разработанной методики распознавания сельскохозяйственных культур на основе дешифрирования [10].

Расчет индекса произведен при помощи формулы:

$$LAI = ((1 + NDVI)/(1 - NDVI) * NDVI)^{0,5},$$

где NDVI – нормализованный вегетационный индекс, рассчитанный по формуле

$$NDVI = ((NIR - Red)/(NIR + Red)),$$

где NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра, RED – отражение в красной области спектра.

Как показал анализ, наибольшее влияние на формирование урожайности картофеля на рассматриваемой территории оказывают условия тепло- и влагообеспеченности.

Большую информативность имеют комплексные показатели, которые отражают как термический режим, так и условия увлажнения. В качестве основного агрометеорологического фактора, определяющего условия вегетации и формирования урожая, был использован гидротермический

коэффициент Г.Т. Селянинова с апреля по 20 июля. При сопоставлении этого фактора с урожайностью оказалось, что в основном неблагоприятные агрометеорологические условия, резко снижающие урожайность картофеля, складывались при низких значениях ГТК, т. е. при возникновении засушливых явлений.

Результаты

Проведен анализ динамики многолетнего ряда урожайности. Урожайность картофеля по всем категориям хозяйств Иркутской области имеет среднюю степень рассеивания данных согласно значению коэффициента вариации (табл. 1). Минимальное значение урожайности было отмечено в 1988 г. и составило 82 ц/га, максимальное – в 1994 г. и составило 186 ц/га.

Для прогноза были построены две экспериментальные модели множественной линейной регрессии (табл. 2). Выбор вошедших в модели параметров и интервала их временного суммирования определялся по фазе вегетации культуры. Для поиска предикторов, вошедших в модели, был использован метод наименьших квадратов. Многофакторные модели,

Таблица 1

Характеристики урожайности картофеля по всем категориям хозяйств на территории Иркутской области (1981–2021)

Характеристика	Значение
Средняя урожайность, ц/га	138,1
Максимум урожайность, ц/га	186,00 (1994 г.)
Минимум урожайность, ц/га	82,00 (1988 г.)
Коэффициент вариации (%)	13
Стандартное отклонение	18,50

Таблица 2

Модели прогноза урожайности картофеля по всем категориям хозяйств Иркутской области с применением индекс листовой поверхности (LAI)

№ модели	Вид модели	Коэффициент детерминации (R)
1	$y = 136,398 + -0,626 \text{ ГТК}(\text{IV} - 20. \text{VII}) + -5,171 \text{ LAI}(\text{VII}) + 1,060 n$	0,62
2	$y = 119,924 + 2,155D (V - 20. \text{VII}) + -5,840 \text{ LAI}(\text{VII}) + 1,017 n$	0,66

y – урожайность, ц/га; $D (V - 20. \text{VII})$ – среднесуточный дефицит насыщения воздуха за периоды, гПа; ГТК (IV – 20. VII) – гидротермический коэффициент Селянинова:

$$\text{ГТК}(\text{IV} - 20. \text{VII}) = \frac{\text{OC}(\text{IV} - 20. \text{VII})}{0,1 \sum_{\text{T}}(\text{IV} - 20. \text{VII})}; \quad n - \text{порядковый номер года.}$$

полученные в результате объединения данных наземной сети и значений индекса дистанционного зондирования LAI, при авторской проверке показали достаточно хорошую оправдываемость.

Оценка успешности методов прогноза урожайности картофеля по всем категориям хозяйств Иркутской области проводилась согласно «Методическим указаниям по проведению производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов» РД 52.27.284-91 [11].

Заключение о качестве метода давалось на основании материалов шестилетней независимой выборки с использованием двух критериев оправдываемости метода и его ошибки.

Модели расчета урожайности картофеля по всем категориям хозяйств соответствуют общепринятому в Росгидромете сроку составления прогноза 1–2 августа. Результаты авторской проверки за период с 2017 по 2021 г., изложенные в табл. 3, показывают в большинстве случаев преимущество новых моделей и достаточно высокую оправдываемость.

Средняя величина относительной ошибки методических прогнозов урожайности картофеля по всем категориям хозяйств с использованием индекса LAI с 2017 по 2019 г. составила по модели 1 – 1,7 %, по модели 2 – 1,8 %, в 2020 г. по модели 1 – 3,6 %, по модели 2 – 3,8 %, в 2021 г. по модели 1 – 2,8 % и по модели 2 – 1,8 %. Средняя относительная ошибка методического прогноза в период 2017–2019 гг. составили 3 %, в 2020 г. – 5 %, в 2021 г. – 2 %. Таким образом, использование спутникового индекса в период с 2017 по 2020 г. позволило улучшить оправдываемость прогноза.

Таблица 3

**Средняя оправдываемость прогноза урожайности картофеля
по всем категориям хозяйств Иркутской области за 2017–2021 гг.
(по величине относительной ошибки).
Дата составления прогноза 1–2 августа**

№ модели	Допустимая погрешность	Методический с использованием LAI	Методический
2017–2019			
1	4,6	98	97
2	4,6	99	97
2020			
1	4,5	96	95
2	4,5	96	95
2021			
1	4,6	97	98
2	4,6	98	98

По величине допустимой погрешности прогнозы экспериментальных моделей оправдались на 100 %. Методический прогноз по величине допустимой погрешности не оправдался в 2020 г.

Заключение

Включение в состав предикторов спутниковой информации позволяет скорректировать начальные условия на момент составления прогноза, снимает необходимость дополнительно учитывать особенности агротехники, также способствует повышению достоверности и точности прогноза.

Таким образом, основываясь на проведенном исследовании, были получены экспериментальные модели прогнозирования урожайности картофеля с использованием дистанционного зондирования (индекс листовой поверхности LAI). Использование LAI в сочетании с многолетним рядом данных урожайности и агрометеорологическими данными наземной сети станций Росгидромета позволяет получить модели прогноза урожайности картофеля по всем категориям хозяйств с достаточно высокой оправданностью.

Литература

1. *Пищимко О.И., Гарафутдинова Л.В.* Прогнозирование урожайности картофеля // Вестн. Бурят. государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. 2022. № 4 (69). С. 15–22. DOI 10.34655/bgsha.2022.69.4.002. EDN HBAVCT.
2. *Старостина Т.В.* Результаты испытания методов прогноза урожайности картофеля, многолетних и однолетних трав по Омской области / Т.В. Старостина, С.М. Кононенко, Т.Ю. Гусарова // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2019. № 46. С. 56–59. EDN ASPATX.
3. Результаты авторских и производственных испытаний в ФГБУ «Гидрометцентр России» автоматизированной технологии составления оценки условий вегетации и прогноза урожайности яровой пшеницы и картофеля по субъектам Российской Федерации / Т.А. Гончарова, Т.А. Найдина, В.М. Лебедева, Н.А. Богомолова // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2014. № 41. С. 111–126. EDN SZWIXD.
4. *Бондур В.Г., Гороховский К.Ю., Игнатьев В.Ю. и др.* Метод прогнозирования урожайности по космическим наблюдениям за динамикой развития вегетации // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2013. № 6. С. 61–68. EDN UIYCWV.
5. *Li D., Miao Y., Gupta S.K. et al.* Improving potato yield prediction by combining cultivar information and UAV remote sensing data using machine learning // Remote Sens. 2021. Vol. 13, No. 16. P. 3322. DOI: 10.3390/rs13163322.

6. *Bala S.K., Islam A.S.* Correlation between potato yield and MODIS-derived vegetation indices // *Int. J. Remote Sens.* 2009. Vol. 30, No. 10. P. 2491–2507. DOI: 10.1080/01431160802552744.
7. *Newton I.H., Tariqul Islam A.F.M., Saifil Islam A.K.M. et al.* Yield prediction model for potato using Landsat time series images driven vegetation indices // *Remote Sens Earth Syst Sci.* 2018. Vol. 1. P. 29–38. DOI: 10.1007/s41976-018-0006-0.
8. *Luo S., He Y., Li Q. et al.* Nondestructive estimation of potato yield using relative variables derived from multi-period LAI and hyperspectral data based on weighted growth stage // *Plant Methods.* 2020. Vol. 16. Article No. 150. DOI: 10.1186/s13007-020-00693-3.
9. *Пицимко О.И., Гарафутдинова Л.В.* Связь урожайности картофеля с гидротермическим коэффициентом и дистанционным зондированием (на примере Иркутской области) // *Теория и практика современной аграрной науки: Сборник VI национальной (всероссийской) научной конференции с международным участием (Новосибирск, 27 февраля 2023 г.).* Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2023. С. 164–167. EDN EIZOBO.
10. *Гарафутдинова Л.В.* Оценка методов классификации многозональных космических снимков // *Вестник Омского государственного аграрного университета.* 2022. № 4 (48). С. 19–28. DOI: 10.48136/2222-0364_2022_4_19. EDN MWSBYQ.
11. РД 52.27.284-91: Методические указания по проведению производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. М.: Гидрометеоиздат, 1991. С. 98–107.

ОПЕРАТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КРАТКОСРОЧНЫХ ПРОГНОЗОВ ГОЛОЛЕДА НА ТЕРРИТОРИИ УРАЛО-СИБИРСКОГО РЕГИОНА

М.Я. Здерева, В.М. Токарев, Н.А. Хлучина, Л.П. Воробьева

*ФГБУ «Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт», Новосибирск*

В основе прогностического метода лежит алгоритм построения логических бинарных деревьев разделения образов, признаками в которых служат выходные модельные параметры. В качестве базовых моделей использованы выходные поля COSMO-Ru13 с шагом 13,2 км и GFS(NCEP) с шагом 0,5°. Решения синхронизированы с заблаговременностью модельных прогнозов. В силу малой обеспеченности данными о гололеде на территории региона получены варианты решений для кластеров радиусом 200 км. Описана оперативная технология производства прогнозов.

Ключевые слова: прогноз гололеда, распознавание образов, бинарные деревья, интерпретация моделей атмосферы.

OPERATIONAL TECHNOLOGY FOR SHORT-TERM GLAZE FORECASTS IN THE TERRITORY OF THE URAL-SIBERIAN REGION

M.Ya. Zdereva, V.M. Tokarev, N.A. Khluchina, L.P. Vorobieva

Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute, Novosibirsk

The prognostic method is based on an algorithm for building logical binary trees for separating patterns, the signs of which are the output model parameters. The output fields of COSMO-Ru13 model with a step of 13.2 km and those of GFS(NCEP) model with a step of 0.5 degrees were used as basic models. The decisions are synchronized with the lead time of the model forecasts. Due to the low availability of data on glaze in the region, additional variants of solutions were obtained for clusters with a radius of 200 km. An operational technology for the production of forecasts is presented.

Key words: glaze forecast, pattern recognition, binary trees, interpretation of atmospheric models.

Сильные гололедно-изморозевые отложения, вызывающие обледенение поверхности земли, деревьев, линий электропередачи, технических средств и различных объектов хозяйственной деятельности человека, входят в перечень опасных метеорологических явлений [1]. Отсутствие надежных методов их прогнозирования обуславливает актуальность исследований, направленных на изучение условий их образования в целях разработок прогностических методик. Задачи прогноза подобных редких явлений усложняются необходимостью учета сочетаний развития атмосферных процессов, комплекса метеорологических факторов и локальных условий, то есть взаимосвязи синоптических, мезометеорологических и микрофизических процессов на конкретных географических пространствах.

Считается, что переохлажденные или замерзающие осадки, приводящие к гололедным явлениям в приземном слое, в подавляющем большинстве случаев формируются перед теплыми фронтами. При этом важно вертикальное распределение температуры и влажности. Среди характерных для обледенения типов стратификации атмосферы [2] наиболее распространенным является сочетание холодного приземного слоя с отрицательными температурами со слоем положительных температур внутри облачности (часто называют его «теплый нос»). При этом фазовые переходы атмосферной воды во время выпадения осадков зависят от толщины как теплого, так и холодного слоев.

Работы по изучению гололедообразования на Урале и юго-востоке Западной Сибири активно проводились в 1960–1970-х гг. В результате на фактическом материале выявлен комплекс необходимых условий:

- переохлажденный дождь, морось, туман или низкая слоистая облачность;
- слои инверсии в пограничном слое атмосферы;
- сочетание температуры воздуха у земли (от +0,5 до –3 °С) и на уровне АТ-850 (от +5 до –5 °С);
- температура воздуха на нижней границе первого слоя инверсии от –0,5 до –8 °С;
- суммарный дефицит точки росы в слое Земля – 850 гПа \leq 3–5 °С;
- очаг теплого воздуха на АТ-850 гПа.

Однако разработать прогностические методы при отсутствии надежных прогностических атмосферных полей в то время было весьма затруднительно. Тем не менее полученные Р.А. Ягудиным [3] графические монограммы для прогноза гололеда и его интенсивности по сочетанию ожидаемой температуры воздуха у земли и фактической высоты изотермы –10 °С являются до сих пор руководством [4] для оперативных подразделений гидрометслужбы.

В настоящее время активизированы разработки в области численного моделирования гололедных явлений. Наиболее сложная проблема в этом направлении – описание микрофизических процессов в облаках, при котором определяются не только поля концентраций облачных капель и ядер кристаллизации, но и тип гидрометеора (водяной пар, облачные капли, дождь, снег, лед, крупа, град) [5]. Есть примеры воспроизведения ситуаций с гололедно-изморозевыми отложениями и в российских исследованиях. В работах [6, 7] приведены результаты отдельных численных экспериментов на базе определенной конфигурации мезомасштабной модели атмосферы WRF-ARW, которые показали возможность воспроизведения как детализированной термической структуры тропосферы в момент образования явления, так и непосредственно полей максимального диаметра отложений гололеда, согласованного с данными наблюдений.

Приведенные примеры можно рассматривать как начальный этап в численном моделировании гололедных явлений. Малое количество экспериментов пока не позволяет сделать выводы об использовании результатов в прогностической практике. Тем не менее авторы [8] предлагают для лучшего понимания условий обледенения использовать данные численного моделирования взамен данных наблюдений, в силу ограниченности последних как по вертикали, так и по горизонтали – и это для Канады. Заметим, что для российской метеорологической сети наблюдений это еще более актуально.

Поле производства оперативных автоматизированных прогнозов гололедных явлений тем не менее оставалось свободным. Перед нами стояла задача создать метод прогноза гололеда с выходом на оперативную технологию, с тем, чтобы использовать результаты в оперативной работе метеорологических служб региона.

Разработка метода прогноза гололеда строилась на уже апробированном ранее алгоритме построения бинарных деревьев для распознавания погодных явлений. Для выхода на прогноз решения строятся на базе ожидаемой термодинамической структуры атмосферы и метеорологических полей, представленных гидродинамическими моделями атмосферы (вариант MOS – Model Output Statistics).

Для построения решающих правил использован алгоритм DW, опыт работы с которым имеется в нескольких разработках ФГБУ «СибНИГМИ» [9]. Методические основы алгоритма, его авторские модификации и основные ключевые моменты описаны в статье настоящего сборника [10].

Для разработки оперативного варианта решений выбрано представление гололеда непосредственно по наблюдениям (КН-01) в бинарном виде (наличие/отсутствие). Первоначальная рабочая выборка предиктанта сформирована по данным наблюдений за период 2014–2019 гг., в дальнейшем она ежегодно дополняется текущими наблюдениями. Фактическая

вероятность гололеда на большей части территории региона очень низкая, менее 5 % случаев, лишь на отдельных метеостанциях Пермского края достигает 15 %. Поэтому в ходе экспериментов деревья решений строились не только по отдельным станциям, но и с объединением выборок по пространству с радиусом 200 км и по территории региона в целом. Для оперативного варианта выбраны решения по кластерам с радиусом 200 км.

1. Подготовка базовых параметров

В качестве признаков в разработанном методе выступают выходные поля гидродинамических моделей COSMO-Ru_Sib13 и GFS(NCEP). Список и подготовка базовых параметров определяются на этапе формирования рабочих архивов. В аналогичном формате они затем выбираются на первом шаге в оперативной технологии производства прогнозов.

Выбор исходных предикторов является важным моментом, существенно влияющим на результаты решений, поэтому он определяется, прежде всего, физической или потенциально возможной связью с искомым явлением. Исходный список включает 33 предиктора (табл. 1). Выбранные признаки отражают термическую и влажностную структуру атмосферы с динамикой по времени, среди них температура в верхнем слое почвы, на поверхности и на уровнях 2 м, АТ-925, характеристики влажности на уровнях до АТ-850, давление на уровне моря, ветер у земли, осадки. Дополнительно рассчитываются температура смоченного термометра у земли и на АТ-850, вертикальные градиенты геопотенциала и температуры, смещенные минимальная температура воздуха у земли и на АТ-850, изменения температуры и давления по времени. В базовый список не вошли прогнозы облачности, типы и количество гидрометеоров в составе атмосферы и другие из-за большой неопределенности в их прогнозировании, что отрицательно влияет на устойчивость статистических решений.

2. Расчет бинарных прогнозов

По описанному алгоритму [10] построены логические решения в виде бинарных деревьев для каждого срока заблаговременности (00+18, 00+42, 00+66, 12+18, 12+42, 12+66) по моделям GFS и COSMO. Приведем примеры окончательных решений для кластеров с центром Гайны (Пермский край) (рис. 1) и с центром Огурцово (Новосибирская область) (табл. 2). Изначально они отличаются фактической вероятностью явления в рабочей выборке: 23 % для сектора Гайны и почти в восемь раз меньше (4 %) для Огурцова. На рисунке наглядно видно разделение дерева на ветки по пороговым значениям базовых параметров, а по таблице можно проследить разбег условных вероятностей первого и второго образа на

Таблица 1

Признаки для DW-решений по моделям COSMO и GFS

№	Параметр	Описание параметра
1–2	Tsm850	Температура смоченного термометра на уровне АТ-850 (в срок, срок + 6 ч) (°C)
3–4	T9-T0	Разность температур, АТ-925-2м (в срок, срок + 6 ч) (°C)
5–6	T8-T0	Разность температур, АТ-850-2м (в срок, срок + 6 ч) (°C)
7–8	RH0	Относительная влажность на высоте 2 м (в срок, срок + 6 ч) (%)
9–10	RH9	Относительная влажность на уровне АТ-925 (в срок, срок + 6 ч) (%)
11–12	UV0	Скаляр вектора скорости на высоте 10 м (в срок, срок + 6 ч) (м/с)
13–14	Tsm0	Температура смоченного термометра на высоте 2 м (в срок, срок + 6 ч) (°C)
15–16	dTd0	Дефицит точки росы на высоте 2 м (в срок, срок + 6 ч) (°C)
17–18	dTd8	Дефицит точки росы на уровне АТ-850 (в срок, срок + 6 ч) (°C)
19	Ts(+6)-Ts(0)	Тенденция температуры поверхности почвы ((срок + 6 ч) – срок) (°C)
20	T(0)-T(-6)	Тенденция температуры на высоте 2 м (срок – (срок – 6 ч)) (°C)
21	T(+6)-T(-6)	Тенденция температуры на высоте 2 м ((срок + 6 ч) – (срок – 6 ч)) (°C)
22	P(0)-P(-6)	Тенденция давления на уровне моря (срок – (срок – 6 ч)) (гПА)
23	P(+6)-P(0)	Тенденция давления на уровне моря ((срок + 6 ч) – срок) (гПА)
24–25	H500-H925	Толщина слоя, АТ500-АТ925 (в срок, срок + 6 ч) (Дам)
26	AP0	Осадки (в срок, срок + 6 ч) (мм)
27	AP+6	Осадки (в срок + 6 ч) (мм)
28	T925	Температура на уровне АТ-925 (в срок) (°C)
29	T850	Температура на уровне АТ-850 (в срок) (°C)
30	Ts	Температура поверхности почвы (в срок) (°C)
31	min(T0+5)	Смещенная минимальная температура на 2 м (ночь) (°C)
32	min(T8-5)	Смещенная минимальная температура на АТ-850 (ночь) (°C)
33	abs(T0+5)	Модуль смещенной минимальной температуры на 2 м (ночь) (°C)

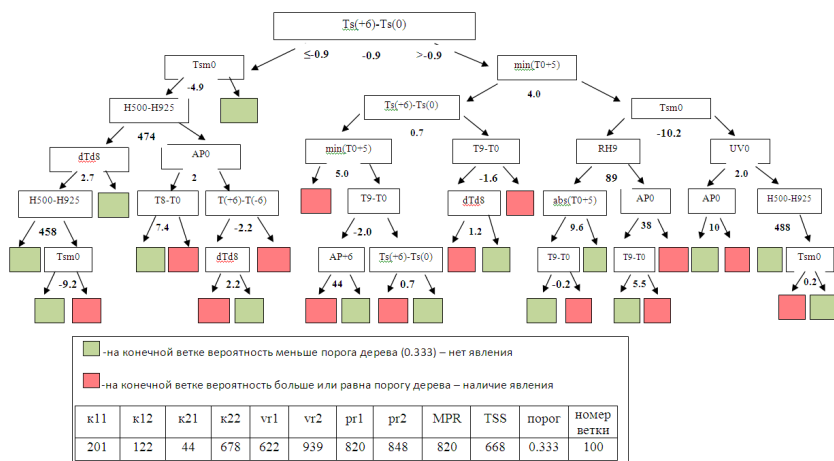


Рис. 1. Бинарное дерево решений и его оценки по матрице сопряженности для прогноза гололеда на базе модели COSMO-Ru13 на срок 00+18. Кластер с радиусом 200 км с центром на метеостанции Гайны. Архивная выборка 2014–2017 гг.

каждом шаге, который был максимизирован с помощью критерия Пирси–Обухова. Конечный порог, определяющий класс решения, получен по критерию MPR, для Гайны – 0,333, для Огурцова – 0,364. По этим порогам представлена матрица сопряженности и основные оценки для построенного дерева. Соответственно, бинарный прогноз явления состоит из сравнения вероятности на законченной ветке, к которой приведут значения текущих модельных данных, с переходным порогом.

Полученные методические решения прошли предварительное тестирование на выборке 2018–2019 гг., не участвующей в обучении. В табл. 3 представлены суммарные по территории за весь период оценки матрицы сопряженности для прогнозов по кластерам радиусом 200 км.

Анализ оценок показал сопоставимость результатов по обеим базовым моделям. В целом по территории предупреждений явления вышла на уровень 65 % на все сроки прогноза, однако при достаточно высоком проценте «ложных тревог» – 75–85 %. По модели COSMO вероятность явления снижается к третьей ночи на 9 % от первых +6 ч, достигая 12 %. По модели GFS на все сроки вероятность на уровне 18–20 %. Средняя оправдываемость прогнозов около 90–93 % и критерий Пирси–Обухова 0,5–0,6 независимо от базовой продукции. Если в сумме по территории результаты по обеим моделям примерно одинаковые, то в прогнозах по станциям преимущество решений по разным моделям меняется, что привело к определению и выбору базовой модели в окончательном решении для каждой станции.

Таблица 2

**Бинарное дерево решений и его оценки по матрице сопряженности
для прогноза гололеда на базе модели COSMO-Ru13 на срок 00+30.
Кластер с радиусом 200 км с центром на метеостанции Огурцово.
Архивная выборка, 2014–2017 гг.**

Но- мер ветки	Число 1-го об- раза	Число 2-го об- раза	Веро- ятность 1-го образа	Параметр	Порог пара- метра	Номер ветки, если «<»	Номер ветки, если «>»	TSS
1	35	944	0,036	dTd0	1,5	2	3	0,362
2	20	198	0,092	AP0	31,0	4	5	0,316
3	15	746	0,020	RH9	88,0	6	7	0,392
4	5	112	0,043	min(T0+5)	4,0	8	9	0,595
5	15	86	0,149	P(0) – P(-6)	-2,0	10	11	0,364
6	5	541	0,009	T(+6) – T(-6)	1,4	12	13	0,623
7	10	205	0,047	Tsm850	0,7	14	15	0,429
8	4	23	0,148	min(T8-5)	80,0	16	17	0,696
9	1	89	0,011	0	0,0	0	0	0,000
10	1	37	0,026	0	0,0	0	0	0,000
11	14	49	0,222	Tsm850	-9,7	22	23	0,408
12	5	204	0,024	T9-T0	0,3	24	25	0,578
13	0	337	0,000	0	0,0	0	0	0,000
14	2	129	0,015	0	0,0	0	0	0,000
15	8	76	0,095	UV0	6,0	30	31	0,513
16	4	7	0,364	0	0,0	0	0	0,000
17	0	16	0,000	0	0,0	0	0	0,000
22	2	27	0,069	0	0,0	0	0	0,000
23	12	22	0,353	Tsm0	-0,1	46	47	0,500
24	0	118	0,000	0	0,0	0	0	0,000
25	5	86	0,055	Ts	-10,8	50	51	0,684
30	2	58	0,033	0	0,0	0	0	0,000
31	6	18	0,250	dTd8	0,9	62	63	0,611
46	12	11	0,522	Ts	-4,5	92	93	0,462
47	0	11	0,000	0	0,0	0	0	0,000
50	1	76	0,013	0	0,0	0	0	0,000
51	4	10	0,286	dTd0	2,2	102	103	0,700
62	0	11	0,000	0	0,0	0	0	0,000
63	6	7	0,462	0	0,0	0	0	0,000
92	1	6	0,143	0	0,0	0	0	0,000
93	11	5	0,688	0	0,0	0	0	0,000
102	4	3	0,571	0	0,0	0	0	0,000
103	0	7	0,000	0	0,0	0	0	0,000
k11	k12	k21	k22	vr1	vr2	pr1	pr2	MPR
25	22	10	922	532	989	714	977	714

Таблица 3

Таблица сопряженности и оценки прогнозов гололеда (код 01) на независимом материале по DW-решениям на базе моделей COSMO и GFS. Холодный период 2018–2019 гг.

Срок	k11	k12	k21	k22	k0	vr1+	vr2-	vr	pr1	pr2	MPR	TSS
COSMO-Ru13												
00+06	1902	6836	1032	93419	103189	22	99	92	65	93	65	0,6
00+18	1645	7186	861	110065	119757	19	99	93	66	94	66	0,6
00+30	1859	7693	1123	93627	104302	19	99	91	62	92	62	0,5
00+42	1603	9646	925	108377	120551	14	99	91	63	92	63	0,5
00+54	1885	9398	1066	92795	105144	17	99	90	64	91	64	0,5
00+66	1662	11509	852	106760	120783	13	99	90	66	90	66	0,6
GFS												
00+06	1813	7228	1040	90552	100633	20	99	912	64	93	64	0,6
00+18	1582	6865	762	111457	120666	19	99	94	67	94	67	0,6
00+30	1854	8037	1027	89849	100767	19	99	91	64	92	64	0,6
00+42	1578	8155	834	110113	120680	16	99	93	65	93	65	0,6
00+54	1865	7969	1054	89084	99972	19	99	91	64	92	64	0,6
00+66	1644	7438	847	110261	120190	18	99	93	66	94	66	0,6

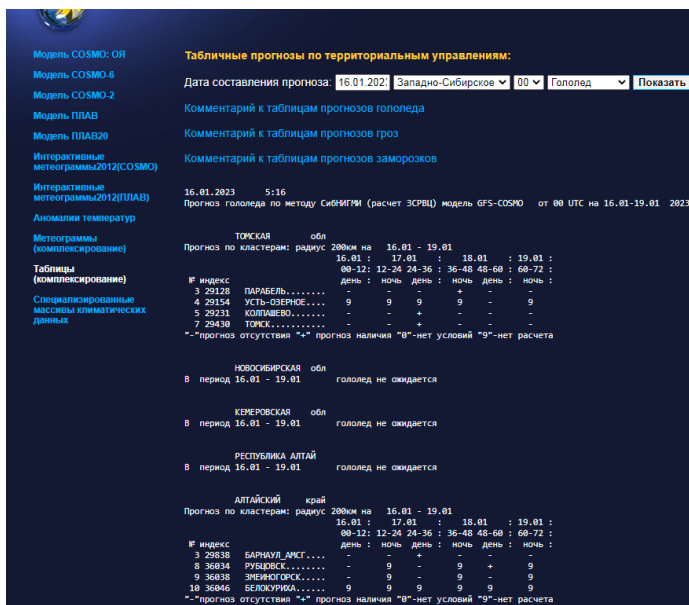


Рис. 2. Пример таблицы прогнозов на сайте sibnigmi.ru

В оперативной работе результаты расчетов формируются в таблицы (пример на рис. 2) для каждого управления гидрометслужбы и передаются пользователям через интернет-ресурсы.

3. Оперативная технология прогнозов

Полученные DW-решения и программы восстановления по ним встроены в оперативную технологию производства краткосрочных прогнозов в ФГБУ «ЗС РВЦ» и в ФГБУ «СибНИГМИ».

Полная технологическая линия производства прогнозов включает следующие блоки:

1. По окончании расчетов модели COSMO_RU_Sib13 – форматирование выходных данных, выбор базовых параметров в ближайших узлах по списку станций региона, расчет дополнительных параметров.

2. Скачивание выходной продукции модели GFS(NCEP). Форматирование выходных данных, выбор базовых параметров в ближайших узлах по списку станций региона, расчет дополнительных параметров.

3. Прогноз гололеда по кластерам радиусом 200 км на 1–3 сут. отдельно по каждой модели. Выбор окончательного решения согласно полученному результату на испытаниях по независимой выборке.

4. Формирование прогнозов в таблицы и передача их пользователям через интернет-ресурсы.

5. Архивирование фактических метеорологических параметров из SQL-базы КН-01.

6. Архивирование результатов расчетов прогнозов явлений.

7. Автоматизированный расчет оценок прогнозов по разработанному методу.

Работа выполнена на современном уровне с использованием выходной продукции актуальных оперативных моделей. К плюсам можно отнести и использование двух моделей различных научных школ для сравнения и оценки их применимости к условиям резко континентального климата на планете, для которого они, по-видимому, специально не адаптировались.

Выполненная работа включает законченные разделы, доведенные до готовых к передаче на оперативные испытания программ усвоения оперативных данных и полностью автоматизированных расчетов прогнозов, и открывает новое направление исследований для прогнозов изморози, отложений мокрого снега. Интерес представляют возможности прогнозирования гололедицы, для внедрения первых результатов которого нормативные документы пока не готовы.

Литература

1. РД 52.27.724-2019. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. М.: ФГБУ «Гидрометцентр России», 2019. 66 с.
2. Шакина Н.П., Хоменко И.А., Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н. Образование и прогнозирование замерзающих осадков: обзор литературы и некоторые новые результаты // Труды Гидрометцентра России. 2012. Вып. 348. С. 130–161.
3. Ягудин Р.А. Рекомендации к прогнозу гололеда на юго-востоке Западной Сибири // Труды ЗСРНИГМИ. 1977. Вып. 30. С. 68–69.
4. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. II. Вып. 2. Урал и Сибирь / Под ред. В.М. Ярковой, И.П. Фадеевой. Л.: Гидрометеоздат, 1988. С. 181–185.
5. Makkonen L., Wichura B. Simulating wet snow loads on power line cables by a simple model // Cold Regions Science and Technology. 2010. Vol. 61, No. 2–3. P. 73–81.
6. Леонов И.И., Соколичина Н.Н. Условия формирования ледяного шторма во Владивостоке в ноябре 2020 года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 4 (382). С. 69–83.
7. Леонов И.И. Структура атмосферы при формировании высокоинтенсивных гололедно-изморозевых отложений. [Электронный ресурс]. URL: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/016.2/2494> (дата обращения: 20.06.2023).
8. Makkonen L., Lozowski E. Numerical Modelling of Icing on Power Network January 2008, Chapter 3 In book: Atmospheric Icing of Power Networks. P. 83–118. DOI: 10.1007/978-1-4020-8531-4_3.
9. Здерева М.Я., Токарев В.М., Хлучина Н.А., Воробьева Л.П., Бабошина Н.А. Оперативная технология прогноза гроз в Сибири и результаты ее испытаний // Труды Гидрометцентра России. 2018. № 2 (368). С. 27–43.
10. Токарев В.М. Анализ методических и алгоритмических вопросов исследования и прогноза переходов температуры через ноль и связанных с ними гололедных явлений // Труды СибНИГМИ. 2023. Вып. 108. С. 71–87.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЕРАТИВНЫХ ИСПЫТАНИЙ МЕТОДА И ТЕХНОЛОГИИ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ГОЛОЛЕДА

М.Я. Здерева¹, Н.А. Хлучина¹, Л.П. Воробьева^{1,4}, Г.А. Шепоренко²,
Е.А. Адаренко³, М.В. Виноградова⁴

¹*ФГБУ «Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт», Новосибирск*

²*ФГБУ «Уральское УГМС», Екатеринбург*

³*ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС», Омск*

⁴*ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС», Новосибирск*

Представлены результаты оперативных испытаний разработанной в СибНИГМИ технологии краткосрочного прогноза гололеда. Расчеты производились ежедневно в холодном периоде по кластерам радиусом 200 км по предварительно построенным бинарным деревьям на базе модельной прогностической продукции COSMO-Ru13 с шагом 13,2 км и GFS(NCEP) с шагом 0,5°. Оценки прогнозов в сравнении с оперативными синоптическими представлены за два холодных периода – 2020–2021 и 2021–2022 гг.

Ключевые слова: матрица сопряженности, оценки успешности прогнозов, результаты испытания метода прогноза гололеда.

RESULTS OF OPERATIONAL TESTING OF THE METHOD AND TECHNOLOGY FOR SHORT-TERM GLAZE FORECAST

M.Ya. Zdereva¹, N.A. Khluchina¹, L.P. Vorobieva^{1,4}, G.A. Sheporenko²,
E.A. Adarenko³, M.V. Vinogradova⁴

¹*Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute, Novosibirsk*

²*Ural Administration for Hydrometeorology
and Environmental Monitoring, Ekaterinburg*

³*Ob-Irtysh Administration for Hydrometeorology
and Environmental Monitoring, Omsk*

⁴*West-Siberian Administration for Hydrometeorology
and Environmental Monitoring, Novosibirsk*

The results of operational tests of the short-term glaze forecasting technology developed at Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute are presented. Calculations were made daily in the cold period for clusters with a radius

of 200 km using pre-built binary trees based on prognostic products of the COSMO-Ru13 model with a step of 13.2 km and of the GFS(NCEP) model with a step of 0.5 degrees. Forecast estimates are presented for two cold periods – 2020–2021 and 2021–2022 and compared with operational synoptic data.

Key words: contingency matrix, estimates of the skill of forecasts, results of testing the method of glaze forecasting.

Разработанный на базе интерпретации продукции гидродинамических моделей с использованием алгоритмов построения бинарных логических деревьев метод прогноза гололеда [1], встроенный в технологическую линию расчетов краткосрочных прогнозов по территории Урало-Сибирского региона [2], был передан на оперативные независимые испытания в прогностические подразделения Уральского, Обь-Иртышского и Западно-Сибирского УГМС. Производственные испытания проводились в периоды февраль–апрель, октябрь–декабрь 2020 г., январь–апрель, октябрь–декабрь 2021 г., январь–март 2022 г. Оценка прогнозов производилась согласно методическим указаниям «Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиофизических прогнозов» [3] и «Наставлению по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения» [4]. При анализе результатов будем использовать матрицу сопряженности (табл. 1) и следующие обозначения показателей успешности прогнозов, связанных с ней:

pr1 – предупрежденность явления, %	$pr1 = k_{11}/k_{01} \cdot 100$
pr2 – предупрежденность случаев без явлений, %	$pr2 = k_{22}/k_{02} \cdot 100$
vr1 – оправдываемость явления, %	$vr1 = k_{11}/k_{10} \cdot 100$
vr2 – оправдываемость отсутствия явления, %	$vr2 = k_{22}/k_{20} \cdot 100$
TSS – критерий Пирси–Обухова, %	$TSS = k_{11}/k_{01} - k_{12}/k_{02}$
LT – ложные тревоги, %	$LT = k_{12}/k_{10} \cdot 100$
PCr – пропуск цели, %	$PCr = k_{21}/k_{01} \cdot 100$

Таблица 1

Таблица сопряженности прогноз – факт

Прогноз	Факт		Всего
	да	нет	
Да	k11	k12	k10
Нет	k21	k22	k20
Всего	k01	k02	k00

1. Результаты оперативных испытаний прогнозов гололеда по территории ФГБУ «Уральское УГМС»

Автоматизированные прогнозы составлялись ежедневно по территории Свердловской, Челябинской, Курганской областей и Пермского края по секторам радиусом около 200 км. В каждом регионе выделено по 6 кластеров, за исключением Курганской области, где выделено 3 кластера.

В технологии предусмотрен автоматизированный расчет оценки успешности прогнозов гололеда. Для автоматизированной оценки по секторам использовались фактические данные наблюдений в радиусе 200 км относительно центральных станций.

Методические прогнозы по административным областям и по пунктам (Екатеринбург, Челябинск, Курган, Пермь) сравнивались с синоптическими прогнозами до двух суток. При анализе результатов по областям за фактический случай с наличием явления принималась ситуация, когда по сводкам КН-01 либо по коду WAREP для опасных явлений был отмечен гололед хотя бы на одной метеостанции в течение рассматриваемых полу-суток. Аналогично интерпретировался автоматизированный прогноз, изначально детализирующий продукцию по станциям.

Средняя оправдываемость прогнозов гололеда по областям Урала, согласно [4], показала сопоставимость качества методических и синоптических прогнозов: наиболее высокие оценки по территории Курганской области и ниже по Пермскому краю (табл. 2). Орографически обусловленная более высокая частота случаев гололеда в Пермском крае усложняет анализ условий для образования явления. Число дней в году с гололедом в Пермском крае 40–71, на территории Курганской области почти в два раза ниже – 24–36, в Свердловской, Челябинской областях – 29–40 [5].

Для редких явлений, к каким относится гололед, общая оправдываемость не является показательной оценкой, поэтому приведем успешность прогнозов обоих классов («да»/«нет») по матрице сопряженности (табл. 3, 4).

Таблица 2

Средняя оправдываемость прогнозов гололеда на первые сутки автоматизированного метода и оперативного синоптического. Февраль 2020 – март 2022 г. Уральское УГМС

Прогноз	Свердловская область		Курганская область		Челябинская область		Пермский край	
	ночь	день	ночь	день	ночь	день	ночь	день
Метод	85	89	93	92	90	88	84	84
Оперативный	87	86	94	93	91	89	82	79

Таблица 3

**Оценки методического прогноза гололеда на первые сутки
по областям Уральского УГМС за период испытания**

Регион	Заблаго- времен- ность	Матрица сопряженности				Оценки, %				TSS	LT	PCr
		k ₁₁	k ₁₂	k ₂₁	k ₂₂	pr1	pr2	vr1	vr2			
Свердловская область	Ночь	64	233	11	130	85	36	22	92	0,21	78	15
	День	75	173	16	174	82	50	30	92	0,32	70	18
Курганская область	Ночь	15	95	11	317	58	77	14	97	0,35	86	42
	День	11	121	5	299	69	71	8	98	0,40	92	31
Челябинская область	Ночь	19	158	3	258	86	62	11	99	0,48	89	14
	День	20	211	0	207	100	50	9	100	0,50	91	0
Пермский край	Ночь	79	239	11	104	88	30	25	90	0,18	75	12
	День	87	223	10	110	90	33	28	92	0,23	72	10
Уральское УГМС	Ночь	177	725	36	809	83	53	20	96	0,36	80	17
	День	193	728	31	790	86	52	21	96	0,38	79	14

Отметим, что корректное сравнение результатов по этим таблицам невозможно ввиду разного подхода к учету территории: оперативные прогнозы составляются по административным областям, автоматизированные – по кластерам с радиусом 200 км.

Предупрежденность наличия гололеда у методических прогнозов выше 80 % на всей территории, кроме Курганской области, где она снижается до 70–60 %. Оправдываемость прогнозов «да» низкая, на территории

Таблица 4

**Оценки оперативного прогноза гололеда на первые сутки
по территориям Уральского УГМС за период испытания**

Регион	Заблаго- времен- ность	Матрица сопряженности				Оценки, %				TSS	LT	PCr
		k ₁₁	k ₁₂	k ₂₁	k ₂₂	pr1	pr2	vr1	vr2			
Свердловская область	Ночь	28	47	46	308	39	87	37	87	0,26	63	61
	День	13	25	52	326	26	93	34	86	0,19	66	74
Курганская область	Ночь	7	28	18	376	28	94	20	95	0,22	80	72
	День	7	27	22	373	24	93	20	94	0,17	80	76
Челябинская область	Ночь	17	67	22	323	43	83	20	94	0,26	80	57
	День	18	63	28	320	39	83	22	92	0,22	78	61
Пермский край	Ночь	72	53	72	232	50	82	58	76	0,32	42	50
	День	70	50	84	225	45	82	58	73	0,27	42	55
Уральское УГМС	Ночь	124	195	158	1239	44	86	39	89	0,30	61	56
	День	108	165	186	1244	37	88	40	87	0,25	60	63

Курганской и Челябинской областей процент «ложных тревог» доходит до 90 %. По критерию Пирси–Обухова самые неудачные прогнозы по Пермскому краю, самые успешные – по Челябинской области.

Оперативные прогнозы также реже всего дают лишние явления на территории Пермского края (примерно 40 %), при этом на остальной части их число возрастает до 80 %. В отличие от методических прогнозов предупреденность явления оперативными прогнозами имеет низкий уровень – 24–50 %.

Из-за малого числа фактических случаев с гололедом корректные выводы по анализу прогнозов по отдельным пунктам территории невозможны. Лишь в Перми в сумме было 24 случая гололеда, на остальных – всего 2–4. Тем не менее во всех указанных пунктах метод, основанный на решениях по кластерам радиусом 200 км, предупредил большее число случаев гололеда (табл. 5). Средняя предупреденность гололеда по четырём пунктам у методического прогноза – 70 %, у синоптического прогноза – 38 %.

Таблица 5

Предупреденность наличия гололеда по пунктам за период испытания (первые сутки)

Показатель	Екатеринбург		Курган		Челябинск		Пермь		Среднее	
	метод	опер	метод	опер	метод	опер	метод	опер	метод	опер
k11	1	0	2	1	1	0	20	12	24	13
k21	3	4	2	3	1	2	4	12	10	21
pr1	25	0	50	25	50	0	83	50	70	38

Таблица 6

Оценки успешности методического прогноза гололеда по областям Уральского УГМС за период испытания на все сроки заблаговременности

Регион	Заблаговременность, ч	Матрица сопряженности				Оценки, %				TSS	LT	PCr
		k ₁₁	k ₁₂	k ₂₁	k ₂₂	pr1	pr2	vr1	vr2			
Челябинская область	0+18	19	158	3	258	86	62	11	99	0,48	89	14
	0+30	20	211	0	207	100	50	9	100	0,50	91	0
	0+42	13	77	1	106	93	58	14	99	0,51	86	7
	0+54	13	91	0	93	100	50	10	100	0,50	90	0
	0+66	11	43	3	140	78	76	20	98	0,54	80	22
Пермский край	0+18	79	239	11	104	88	30	25	90	0,18	75	12
	0+30	87	223	10	110	90	33	28	92	0,23	72	10
	0+42	27	87	10	70	73	44	24	88	0,17	76	27
	0+54	34	96	5	57	87	37	26	92	0,24	74	13
	0+66	33	119	5	37	86	24	22	88	0,10	78	14

В табл. 6 представлены оценки автоматизированного прогноза на все сроки заблаговременности для Челябинской области с наиболее высокими показателями критерия Пирси–Обухова и для Пермского края – с наиболее низкими. Видно, что оценки слабо меняются по времени: в Челябинской области лишь на последнем сроке примерно на 20 % снизилась предупреденность, при этом на 10 % увеличилась оправдываемость v_{t1} ; в Пермском крае с наиболее низкой предупреденностью выделился один ночной срок – 0 + 42 ч.

2. Результаты оперативных испытаний прогнозов гололеда по территории Обь-Иртышского УГМС

Автоматизированные прогнозы составляются ежедневно по Омской, Тюменской областям и Ханты-Мансийскому АО.

Если методические прогнозы рассматривать аналогично оперативным прогнозам по территориям с использованием принятой терминологии «местами» или «на большей части», то можно сравнить их оправдываемость согласно «Наставлению...» [4]. Самые успешные прогнозы по обоим подходам для Тюменской области, у синоптиков они приближаются к 100 % независимо от месяца (табл. 7). Ниже 90 % оправдываемость у оперативных прогнозов была лишь в октябре 2021 г. в Ханты-Мансийском округе. По автоматизированному методу оценки менее устойчивы в суточном и годовом ходе, наиболее низкие – для дневных прогнозов в конце зимы – в марте каждого года. Средние оценки оправдываемости прогнозов по разработанному методу за весь период испытания выше 85 % для всех выделенных территорий, но при этом уступают оперативным прогнозам на 10–13 %.

Репрезентативное сравнение показателей успешности прогнозов по матрице сопряженности невозможно по той же причине, что и на территории Уральского УГМС. Однако ориентировочно можно взвесить соотношение вероятности и предупреденности явления по автоматизированному и синоптическому методам (табл. 8, 9). Наиболее высокую предупреденность (до 90 %) показали методические прогнозы для Омской области, при этом процент «ложных тревог» несущественно отличается от прогнозов по Тюменской области, но на 10–15 % выше, чем по территории Ханты-Мансийского округа. У синоптических прогнозов для Омской области наихудшее соотношение предупреденности и вероятности явления. Самые успешные оперативные прогнозы в испытываемом периоде были по территории Тюменской области: оправдываемость наличия явления 53–60 % и предупреденность около 70 %.

В табл. 10 приведены случаи предупреденности явления в синоптических и оперативных прогнозах гололеда на первые сутки по админи-

Таблица 7

**Средняя оправдываемость прогнозов гололеда на первые сутки
по автоматизированному методу и по оперативному.
Февраль 2020 – март 2022 г.**

Месяц		Методический прогноз					
		Омская область		Тюменская область		ХМАО	
		ночь	день	ночь	день	ночь	день
Февраль	2020	84	81	83	81	87	84
Март	2020	81	82	82	81	83	80
Октябрь	2020	89	85	95	86	89	85
Ноябрь	2020	84	83	88	86	88	87
Декабрь	2020	92	90	90	94	92	93
Январь	2021	95	94	94	98	95	92
Февраль	2021	95	90	89	90	93	97
Март	2021	86	83	92	82	86	83
Октябрь	2021	86	86	90	86	88	85
Ноябрь	2021	84	85	88	83	89	87
Декабрь	2021	84	86	90	90	94	92
Январь	2022	94	90	92	94	90	92
Февраль	2022	88	88	92	92	85	81
Март	2022	90	85	88	82	89	84
ИТОГ		88	86	90	88	89	87

Оперативный прогноз

Месяц		Омская область		Тюменская область		ХМАО	
		ночь	день	ночь	день	ночь	день
Февраль	2020	97	98	98	98	96	96
Март	2020	92	93	97	98	95	94
Октябрь	2020	99	98	100	100	94	93
Ноябрь	2020	95	97	99	100	94	94
Декабрь	2020	100	100	100	100	100	100
Январь	2021	98	98	99	100	100	100
Февраль	2021	100	98	99	100	97	98
Март	2021	97	95	100	100	98	98
Апрель	2021	98	98	99	100	93	93
Октябрь	2021	96	96	99	100	89	86
Ноябрь	2021	92	92	99	98	98	100
Декабрь	2021	98	99	99	100	100	100
Январь	2022	98	99	100	100	100	100
Февраль	2022	100	100	100	100	100	100
Март	2022	97	94	99	100	100	100
ИТОГ		97	97	99	99	97	97

Таблица 8

**Оценки методического прогноза гололеда на первые сутки
по территории Обь-Иртышского УГМС за период испытания**

Регион	Заблаговременность	Матрица сопряженности				Оценки, %				TSS	LT	PCr
		k ₁₁	k ₁₂	k ₂₁	k ₂₂	pr1	pr2	vr1	vr2			
Омская область	Ночь	28	207	5	204	85	50	12	98	0,35	88	15
	День	26	233	2	183	93	44	10	99	0,37	90	7
Тюменская область	Ночь	31	150	20	243	61	62	17	92	0,23	83	39
	День	33	183	18	210	65	53	15	92	0,18	85	35
ХМАО	Ночь	54	177	35	178	61	50	23	84	0,11	77	39
	День	73	217	25	129	75	37	25	84	0,12	75	25

Таблица 9

**Оценки оперативного прогноза на первые сутки
по территории Обь-Иртышского УГМС за период испытания**

Регион	Заблаговременность	Матрица сопряженности				Оценки, %				TSS	LT	PCr
		k ₁₁	k ₁₂	k ₂₁	k ₂₂	pr1	pr2	vr1	vr2			
Омская область	Ночь	14	48	25	398	36	89	23	94	0,25	77	64
	День	13	52	20	400	39	89	20	95	0,28	80	61
Тюменская область	Ночь	16	14	8	446	67	97	53	98	0,64	47	33
	День	12	8	5	459	71	98	60	99	0,69	40	29
ХМАО	Ночь	25	49	8	402	76	89	34	98	0,65	66	24
	День	23	48	15	398	61	89	32	96	0,50	68	39

Таблица 10

**Предупрежденность наличия гололеда по пунктам за период испытания
(первые сутки)**

Факт гололеда	Омск		Тюмень		Ханты-Мансийск		Среднее	
	метод	опер	метод	опер	метод	опер	метод	опер
k11	6	3	9	4	5	0	20	7
k21	1	4	0	5	1	6	2	15
pr1	86	43	100	44	83	0	91	32

стративным центрам. Несмотря на малое число случаев, можно увидеть, что в целом по автоматизированному методу предсказано 90 %, что в три раза больше, чем оперативными прогнозами.

3. Результаты оперативных испытаний прогнозов гололеда по территории Западно-Сибирского УГМС

Автоматизированные прогнозы составляются ежедневно по Новосибирской, Томской, Кемеровской областям, Алтайскому краю, Республике Алтай. Для оценки привлекались данные фактических наблюдений явления не только из телеграмм кода КН-01, но и из штормовых сообщений в коде WAREP.

В ходе испытаний проанализировано 4180 случаев (по 836 случаев расчетов прогнозов гололеда для каждой области (края) отдельно). За период испытания было отмечено 489 случаев гололеда по территории ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС»: в Новосибирской области – 99, Томской – 130, Кемеровской – 88, Алтайском крае – 109 и Республике Алтай – 63 случая.

Для сравнения качества оперативных и методических прогнозов гололеда последние рассматривались с использованием принятой терминологии в синоптических прогнозах по областям (краю) на подведомственной территории.

Наиболее успешны прогнозы по Томской области: автоматизированный метод и синоптики предупредили примерно 77–78 % всех случаев (табл. 11). Однако автоматизированный метод давал наличие явления поч-

Таблица 11

Оценки методического и оперативного прогноза гололеда на первые сутки по территории Западно-Сибирского УГМС за период испытания

Регион	Прогноз	Матрица сопряженности				Оценки, %				TSS	LT	PCr
		k ₁₁	k ₁₂	k ₂₁	k ₂₂	pr1	pr2	vr1	vr2			
Новосибирская область	Метод	73	409	26	328	74	44	15	93	0,18	85	26
	Опер	50	57	49	680	50	92	47	93	0,42	53	50
Томская область	Метод	100	281	30	425	77	60	26	93	0,37	74	23
	Опер	101	280	29	426	78	60	27	94	0,38	73	22
Кемеровская область	Метод	51	228	37	520	58	70	18	93	0,28	82	42
	Опер	47	66	41	682	53	91	42	94	0,44	58	47
Республика Алтай	Метод	83	349	26	378	76	52	19	94	0,28	81	24
	Опер	67	64	42	663	61	91	51	94	0,52	49	39
Горный Алтай	Метод	15	103	48	670	24	87	13	93	0,11	87	76
	Опер	22	118	41	655	35	85	16	94	0,20	84	65

ти в два раза чаще, чем оно наблюдалось, как результат – понижена оценка предупрежденности класса прогнозов с отсутствием явления, как следствие – критерий Пирси–Обухова почти в два раза ниже. Ниже на 20 %, но примерно одинаковая в сравниваемых подходах предупрежденность гололеда в Кемеровской области, но и здесь метод уступает в общей картине успешности из-за большего числа «ложных тревог». В Новосибирской области и на территории Алтайского края автоматизированный метод на 24 и 15 % реже пропускает наблюдавшееся явление, но в целом опять же теряет преимущество, прогнозируя явление чаще. В горной части Республики Алтай оба метода (автоматизированный и синоптический) имеют сравнимые, но очень низкие оценки. В сложных орографически неоднородных условиях не только качество базовых модельных данных существенно ниже, но и использовать для решений данные по кластерам с большим радиусом нельзя (авторы сделают поправку при усовершенствовании метода).

Для административных центров (Новосибирск, Томск, Кемерово, Барнаул) было произведено сравнение прогнозов по испытываемому методу с прогнозами по внедренному расчетному методу (автор Р.А. Ягудин) [6, 7] и с оперативными прогнозами синоптиков Гидрометцентра и ЦГМС ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС». Оперативные прогнозы показали разброс успешности для разных пунктов: от самых высоких результатов для Барнаула (и предупрежденность, и вероятность явления в районе 80 % и

Таблица 12

Оценки прогноза гололеда по вновь разработанному и по действующему методам в сравнении с качеством оперативных прогнозов на первые сутки по пунктам за период испытания

Регион	Прогноз	Матрица сопряженности				Оценки, %				TSS	LT	PCr
		k ₁₁	k ₁₂	k ₂₁	k ₂₂	pr1	pr2	vr1	vr2			
Новосибирск	Метод	15	182	21	618	42	77	8	97	0,19	92	58
	Опер	3	8	33	792	8	99	25	96	0,07	75	92
	Ягудин	15	49	21	751	42	94	8	97	0,36	92	58
Томск	Метод	17	147	18	654	49	82	10	97	0,31	90	51
	Опер	10	44	25	757	29	95	19	97	0,24	81	71
	Ягудин	11	118	24	683	31	85	9	97	0,16	91	69
Кемерово	Метод	6	148	12	670	33	82	4	98	0,15	96	67
	Опер	0	0	18	818	0	100	0	98	0	100	100
	Ягудин	2	90	16	728	11	89	2	98	0	98	89
Барнаул	Метод	7	120	14	695	33	85	6	98	0,18	94	67
	Опер	16	3	5	812	76	100	84	99	0,76	16	24
	Ягудин	3	27	18	788	14	97	10	98	0,11	90	86

выше с критерием Пирси–Обухова 0,76) до непредусмотренности ни одного из 18 случаев с гололедом для Кемерова (табл. 12). Автоматизированные методические прогнозы более стабильны по качеству.

Заключение

Полностью автоматизированный метод прогноза гололеда, основанный на построении решений по алгоритму распознавания образов на базе выходной продукции современных моделей атмосферы COSMO и GFS (NCEP), разработан впервые. Выражаем благодарность всем, кто испытывал полученные решения для территории Урало-Сибирского региона. Было непросто рассчитывать показатели успешности метода из-за вывода результатов по достаточно большим кластерам, выходящим за рамки административных делений. Не во всех подразделениях удалось провести корректное сравнение с оперативными прогнозами. Тем не менее общая картина по качеству автоматизированных прогнозов получена.

Основной вывод – разработанный автоматизированный метод позволяет составлять детализированный прогноз гололеда по территории Урало-Сибирского региона. В большинстве подразделений прогноз гололедных явлений строится на анализе синоптических условий их образования, и развитие помогающих инструментов очень важно. По решениям техсоветов соответствующих УГМС, подтвержденным Центральной методической комиссией (от 23.12.2022 г., от 29.05.2023 г.), он принят в работу как вспомогательный.

Практически на всей территории отмечен достаточно высокий уровень предупрежденности образования гололеда. Однако работать есть над чем – необходимо оптимизировать решения в целях сокращения числа «лишних» прогнозов с явлением. Один из вариантов улучшения качества метода – это дальнейшее накопление архивного материала и построение новых решений с использованием модельных выходных данных после 2019 г. Такой шаг одновременно учитывает и возможные модификации в физических блоках базовых моделей, и динамику признаков, взятых для построения их связи с природным явлением. Параллельно можно продолжать работу по исследованию применения других подходов к формированию входных выборок предикторов и предиктанта, по поиску наиболее репрезентативных критериев на разных этапах отбора решений.

Литература

1. *Токарев В.М.* Анализ методических и алгоритмических вопросов исследования и прогноза переходов температуры через ноль и связанных с ними гололедных явлений // Труды СибНИГМИ. 2023. Вып. 108. С. 71–87.

2. *Здерева М.Я., Токарев В.М., Хлучина Н.А, Воробьева Л.П.* Оперативная технология краткосрочных прогнозов гололеда на территории Урало-Сибирского региона // Труды СибНИГМИ. 2023. Вып. 108. С. 112–121.
3. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиофизических прогнозов. М.: Госкомгидромет, 1991.
4. РД 52.27.724-2019. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. М.: ФГБУ «Гидрометцентр России», 2019. 66 с.
5. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Вып. 9. СПб.: Гидрометеоздат, 1990. 557 с.
6. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. II. Вып. 2. Урал и Сибирь / Под ред. В.М. Ярковой, И.П. Фадеевой. Л.: Гидрометеоздат, 1988. С. 181–185.
7. *Ягудин Р.А.* Рекомендации к прогнозу гололеда на юго-востоке Западной Сибири // Труды ЗСРНИГМИ. 1977. Вып. 30. С. 68–69.

**ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГОДОВОГО КОЛИЧЕСТВА
ТВЕРДЫХ ОСАДКОВ НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ
ПО ДАННЫМ ИХ СКОРРЕКТИРОВАННЫХ ЗНАЧЕНИЙ
ЗА ПЕРИОД 1936–2021 гг.**

О.А. Мясникова

*ФГБУ «Главная Геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова»
(ФГБУ «ГГО»), Санкт-Петербург*

Современная методика корректировки измеренных осадков позволяет получить их значения, свободные от основных составляющих систематической погрешности стандартных осадкомерных приборов (осадкомера Третьякова и дождемера с защитой Нифера), вызванной аэродинамическими свойствами приборов, процессами испарения, конденсации и смачивания в осадкосборнике, а также количеством «ложных» осадков, попадающих в прибор во время общей и низовой метелей. Применение данной методики решает вопрос о получении однородных временных (годовых, сезонных или иных) рядов скорректированных осадков за весь период инструментальных наблюдений.

На основе новой методики рассчитаны скорректированные годовые абсолютные и относительные значения твердых осадков и получены их статистически однородные ряды для сети климатических станций Росгидромета за период с 1936 по 2021 г. Рассчитаны и проанализированы временные тренды твердых осадков, оценен их вклад в величину изменений общих годовых сумм осадков по территории Западной Сибири. Рассмотрена связь между изменением температуры воздуха в период выпадения твердых осадков и их годовыми суммами.

Полученные в ходе исследования результаты изменений, происходящих в режиме увлажнения в холодный период территории Западной Сибири, представляют научный интерес, в том числе при разработке адаптационных мер к изменению и изменчивости климата.

***Ключевые слова:** климат, твердые осадки, однородность рядов наблюдений, корректировка осадков, временные изменения.*

**TIME VARIATIONS OF ANNUAL SOLID PRECIPITATION
ON THE TERRITORY OF WESTERN SIBERIA ACCORDING
TO THEIR CORRECTED VALUES FOR THE PERIOD OF 1936–2021**

O.A. Myasnikova

Voeikov Main Geophysical Observatory, St Petersburg

The modern method of correcting measured precipitation makes it possible to obtain their values, free from the main components of the systematic error of standard precipitation gauges (Tretyakov precipitation gauge and precipitation gauge with Nifer protection), caused by the aerodynamic properties of the instruments, the processes of evaporation, condensation and wetting in the sediment collector, as well as the amount of “false” precipitation falling into the device during a general and blowing snow. The application of this technique solves the issue of obtaining homogeneous time (annual, seasonal or other) series of corrected precipitation amount for the entire period of instrumental observations.

Based on the new methodology, the corrected annual absolute and relative values of solid precipitation were calculated and their statistically homogeneous series were obtained for the network of climatic stations of Roshydromet for the period from 1936 to 2021. The time trends of solid precipitation are calculated and analyzed, their contribution to the magnitude of changes in the total annual precipitation over the territory of Western Siberia is estimated. The relationship between the change in air temperature during the period of solid precipitation and their annual amount is considered.

The results of the changes occurring in the humidification regime during the cold period of the territory of Western Siberia obtained during the study are of scientific interest, including in the development of adaptation measures to climate change and variability.

Key words: *climate, solid precipitation, record homogeneity, precipitation correction, time variations.*

Введение

В последнее десятилетие мировое сообщество уделяет все большее внимание разработке адаптационных мер к изменению и изменчивости климата.

Одним из основных требований к наблюдениям, служащим основой для оценки изменения климата, является однородность временных рядов данных [1] и, в частности, однородность рядов количества атмосферных осадков.

Высокое качество информации о количестве атмосферных осадков, получаемой от государственной наблюдательной сети, является актуальной проблемой на протяжении всего периода инструментальных наблюдений за атмосферными осадками. Необходимым условием для получения достоверных результатов измерения количества атмосферных осадков является отсутствие систематических различий между измеренными суммами осадков за разные промежутки времени на протяжении исследуемого периода наблюдений.

Основными причинами нарушения однородности временных рядов осадков для территории России являются: замена в 1950-х гг. дождемера

с защитой Нифера на осадкомер Третьякова с разными систематическими погрешностями на всех станциях и постах Росгидромета, изменение методик выполнения измерений, изменение числа сроков наблюдений за количеством осадков в сутки, а также изменение во времени условий местоположения приборов.

Количество атмосферных осадков, измеренных с помощью любого осадкомерного прибора, как правило, меньше, чем количество действительно выпавших осадков, вследствие имеющихся систематических погрешностей, связанных с конструкцией прибора и принятой методикой измерений.

К числу основных систематических погрешностей относятся: аэродинамическая (ветровой недоучет осадков), потери осадков на смачивание внутренней поверхности осадкосборника, искажения за счет процессов испарения и конденсации, а также наметание в осадкомер снега, поднятого с поверхности снежного покрова при метелях (так называемый эффект «ложных» осадков, когда количество измеренных осадков может оказаться преувеличенным по сравнению с действительным количеством осадков, выпавших из облаков).

Величины систематических погрешностей варьируют в зависимости от конструкции осадкомерного прибора, места его установки, вида атмосферных осадков и метеорологических условий их выпадения. В большинстве случаев они столь значительны, что сильно затрудняют использование сведений об осадках при изучении климата. Особенно значения этих погрешностей велики для твердых осадков.

С начала наблюдений осадки измерялись дождемерами различных конструкций. С 1887 г. основным прибором для измерения осадков был дождемер с защитой Нифера. В период с 1948 по 1959 г. дождемеры с защитой Нифера были постепенно заменены осадкомерами конструкции В.Д. Третьякова (О-1). Главной причиной замены приборов был слишком большой недоучет дождемером твердых осадков. Массовые полевые испытания осадкомера конструкции Третьякова показали, что этот прибор улавливает выпадающие твердые и смешанные осадки существенно лучше, чем дождемер, благодаря лучшим аэродинамическим свойствам планочной защиты.

По оценкам исследований 1960–1970 гг. [2–5], количество жидких осадков систематически преуменьшается на 10–15 % измеренной суммы для дождемера и осадкомера, а количество твердых и смешанных осадков – на 30–60 % для осадкомера и более чем на 50 % для дождемера. При скоростях ветра более 10 м/с количество ложных осадков в осадкомере в 3 раза может превышать уловленное им количество осадков из облаков.

Длительные и детальные исследования погрешностей осадкомера, проводившиеся с конца 1950-х до середины 1980-х гг. специалистами

ФГБУ «ГГО» и ФГБУ «ГГИ» [6–8], позволили разработать методику корректировки результатов измерения осадков осадкомером первоначально на уровне их средних многолетних значений [9]. В последующие годы была разработана усовершенствованная методика автоматизированной корректировки суточных значений осадков, поступивших из облаков на поверхность земли в пункте наблюдений, измеренных осадкомером [10–12] и дождемером [13], свободных от основных систематических погрешностей измерения осадков с использованием комплекса метеорологических параметров и сведений о характеристиках местоположения осадкомерного прибора. Применение автоматизированной методики корректировки смогло решить вопрос о получении однородных временных (годовых, сезонных или иных) рядов скорректированных осадков за весь период инструментальных наблюдений.

Целью данной работы является сравнительный анализ измеренных и скорректированных характеристик количества осадков за период с 1936 по 2021 г., а также исследование пространственного распределения коэффициентов линейных трендов для скорректированных сумм твердых осадков на территории Западной Сибири.

Исследования, связанные с определением тенденций изменения режима осадков, проводятся также специалистами ФГБУ «ИГКЭ» по разработанной ими методике мониторинга климата. Результаты ежегодно публикуются в [14], а также приведены в [15, 16].

Методика расчетов и результаты корректировки атмосферных осадков

На основе созданного во ВНИИГМИ-МЦД улучшенного архива синоптических данных из 3- и 6-часовых наблюдений, содержащего сведения начиная с 1936 г., в ФГБУ «ГГО» был подготовлен электронный архив исправленных суточных (срочных) сумм осадков, гомогенизированных путем устранения основных систематических погрешностей осадкомерных приборов для 557 климатических метеорологических станций. Архив регулярно пополняется, и на настоящий период его можно считать наиболее близким к эталонному.

На основе архива исправленных суточных (срочных сумм) осадков для 67 реперных климатических станций, расположенных на территории Западной Сибири, за исследуемый период были получены скорректированные данные: годовые суммы осадков, средние многолетние суммы осадков, а также годовые и средние многолетние суммы осадков разных видов (жидких, твердых, смешанных). По данным рядов исправленных осадков для всех станций получены коэффициенты линейных трендов, выполнена оценка их статистической значимости в соответствии с реко-

мендациями, изложенными в [17]. Для принятия гипотезы о наличии линейного тренда использован 95%-й уровень значимости. Оценка значимости определялась при условии, что $|\beta| > 2\sigma_\beta$, где β – коэффициент регрессии линии тренда, σ_β – его среднее квадратическое отклонение.

Для определения связи временных изменений годового количества твердых осадков на территории Западной Сибири с изменением температуры воздуха в период выпадения твердых осадков за период с 1936 по 2021 г., для всех станций были получены коэффициенты линейных трендов температуры воздуха и выполнена оценка их статистической значимости.

На территории Западной Сибири, имеющей значительную протяженность по долготе, сменяются шесть природных зон: тундра, лесотундра, тайга, зона смешанных и широколиственных лесов, лесостепь и степь. Континентальность нарастает к югу, по мере удаления от побережья Северного Ледовитого океана, что выражается в увеличении годовой амплитуды температур и уменьшении количества осадков. Для данной территории характерна значительная изменчивость как годового количества атмосферных осадков, так и их месячных сумм. Для получения более обобщенных результатов и их лучшей статистической обеспеченности все станции, расположенные на территории Западной Сибири, были распределены по трем регионам: территория Западной Сибири севернее 64° с.ш. (зона лесотундры), центральная часть Западной Сибири, расположенная между 64° с.ш. и 58° с.ш. (лесная зона), территория Западной Сибири южнее 57° с.ш. (зоны лесостепи и степи), и были рассчитаны средние арифметические значения отношений по станциям, расположенным в этих регионах.

Влияние корректировки на изменение климатических характеристик количества осадков за 83-летний период (с 1936 по 2021 г.) представлено в табл. 1. В ней приведены данные об исправленных (P_r) и измеренных (P_r'') средних многолетних годовых суммах осадков, их отношении (P_r/P_r''), а также отношение исправленных осадков к измеренным для

Таблица 1

**Среднее многолетнее годовое количество исправленных (P_r)
и измеренных (P_r'') осадков, их отношения (P_r/P_r''),
отношения осадков разных видов ($P_{тв}/P_{тв}''$), ($P_{ж}/P_{ж}''$), ($P_{см}/P_{см}''$)**

Станция, регион	P_r , мм	P_r'' , мм	P_r/P_r''	$P_{тв}/P_{тв}''$	$P_{см}/P_{см}''$	$P_{ж}/P_{ж}''$
Севернее 64° с.ш.	544	435	1,25	1,41	1,15	1,21
Центральная часть Западной Сибири, между 64° с.ш. и 58° с.ш.	583	489	1,19	1,50	1,10	1,14
Южнее 58° с.ш.	473	389	1,22	1,45	1,12	1,20

жидких ($P_{\text{ж}}/P''_{\text{ж}}$), твердых ($P_{\text{тв}}/P''_{\text{тв}}$) и смешанных ($P_{\text{см}}/P''_{\text{см}}$) по выделенным регионам.

Анализ временных изменений годового количества твердых осадков в прибрежном районе арктической зоны (выше 67 параллели) не проводился из-за отсутствия в нем реперных климатических станций, также не анализировались временные изменения годового количества твердых осадков, измеренных на станциях, расположенных в горных районах, поскольку, в силу пестроты в распределении ветров и большого влияния местных особенностей, измеренные осадки несопоставимы между собой даже в близко расположенных пунктах [18].

Наибольшее годовое количество осадков выпадает в лесной зоне и связано с наибольшим развитием циклонической деятельности. К северу и к югу от этой зоны количество осадков убывает. Уменьшение осадков к северу от этой зоны связано главным образом с малым влагосодержанием преобладающего здесь арктического воздуха, а уменьшение к югу является следствием ослабления циклонической деятельности и повышения температуры.

Как видно из табл. 1, максимальные значения отношений скорректированных величин осадков к измеренным отмечаются в центральной части Западной Сибири – в лесной зоне. Эта закономерность в значительной степени объясняется зависимостью величины систематических погрешностей от преобладания того или иного вида осадков в их годовом количестве, т. е. чем больше доля твердых осадков и выше значения скорости ветра в период их выпадения, тем больше величина отношения. Скорректированное среднее многолетнее годовое количество осадков для всех трех регионов значительно превышает измеренное. Для района лесотундры превышение составляет порядка 30 %, для центральной части Западной Сибири и южного степного региона – порядка 20 %.

В целом из отношений скорректированных величин осадков разных видов к измеренным видно, что наибольшей корректировке подвергались твердые осадки, количество которых почти на 50 % больше измеренного, в отличие от скорректированного среднего многолетнего количества жидких осадков, которое больше измеренного на 20 %. Связано это с тем, что на измеряемое количество твердых осадков наиболее сильно влияет скорость ветра на высоте ветроизмерительного прибора, и соответственно, влияние корректировки более существенно [19].

Территориальное распределение значений $P_{\text{тв}}/P''_{\text{тв}}$, $P_{\text{ж}}/P''_{\text{ж}}$ и $P_{\text{см}}/P''_{\text{см}}$ зависит только от ветрового и влажностного режимов данной станции, ее защищенности. Минимальные отношения $P_{\text{тв}}/P''_{\text{тв}}$ для твердых осадков наблюдаются либо на защищенных в течение всего периода станциях, либо, наоборот, на открытых с высокими скоростями ветра, частыми метелями.

Таблица 2

**Твердые, смешанные и жидкие осадки в процентах
от средних многолетних годовых сумм измеренных и исправленных осадков
за период наблюдений**

Регион	Измеренные осадки (P''), %			Исправленные осадки (P), %		
	жидкие	смешан.	твердые	жидкие	смешан.	твердые
Севернее 64° с.ш.	57,2	6,8	36,0	52,6	6,5	40,9
Центральная часть Западной Сибири, между 64° с.ш. и 57° с.ш.	65,5	6,3	28,2	60,6	6,1	33,3
Южнее 57° с.ш.	70,1	7,5	22,4	65,0	7,3	27,7

Кроме расчета вышеуказанных характеристик, был определен вклад в общее количество измеренных и скорректированных атмосферных осадков разных видов осадков по выделенным регионам. Расчеты приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, в направлении с севера на юг прослеживается увеличение количества жидких осадков и планомерное уменьшение количества твердых. Наибольшая доля твердых осадков, как измеренных, так и исправленных, наблюдается в лесотундре, наименьшая – в южных и приграничных районах. Все три зоны характеризуются небольшой долей смешанных осадков, которая составляет 6–7 % от их общего числа. В результате корректировки количества измеренных осадков в их годовом количестве произошло закономерное перераспределение доли твердых, смешанных и жидких осадков. Для станций всех трех регионов доля твердых осадков увеличилась на 5 % вследствие их выдувания. Доля исправленных величин жидких осадков, соответственно, повсеместно уменьшится. Для северного региона доля скорректированных величин средних многолетних годовых твердых осадков составляет порядка 40 % от их общего числа, для центральной части Западной Сибири – около 33 % и для южного региона – 28 %.

Временные изменения количества твердых атмосферных осадков

Полученные в результате корректировки однородные исторические ряды действительного количества осадков за период с 1936 по 2021 г. позволили проследить временные изменения годового количества твердых осадков на исследуемых станциях.

По данным рядов исправленных величин осадков для всех станций получены коэффициенты линейных трендов, которые дают наиболее пол-

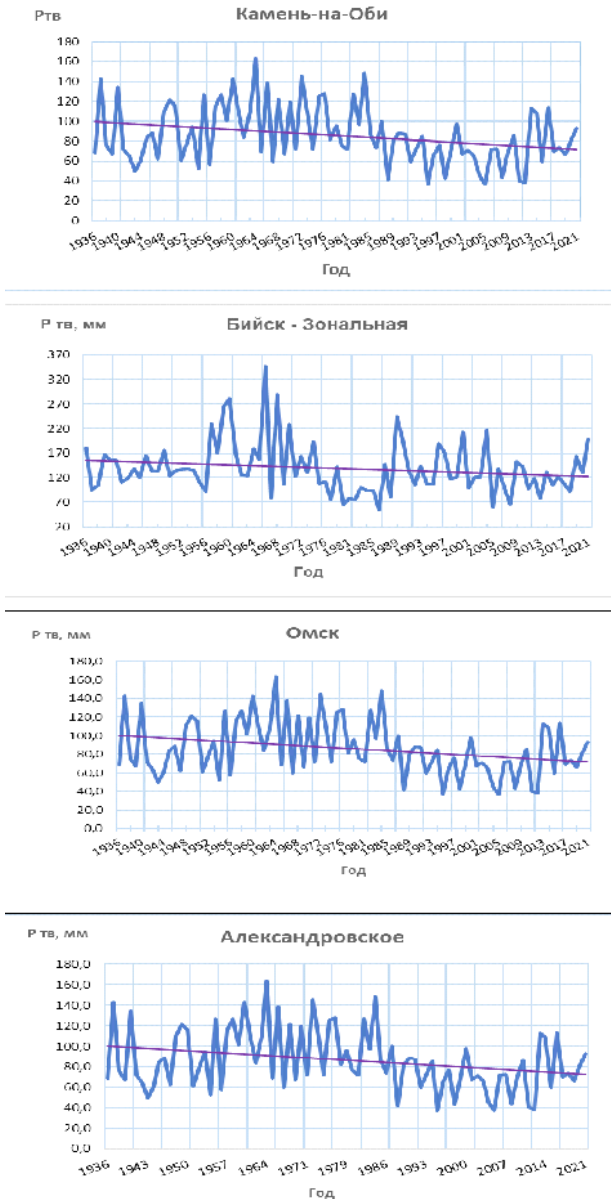


Рис. 1. Временные ряды исправленных значений годового количества твердых осадков и их линейные тренды для станций Камень-на-Оби, Бийск Зональная, Омск и Александровское с 1936 по 2021 г.

ную картину современных тенденций изменения количества твердых осадков на территории Западной Сибири.

Примеры временных рядов годовых сумм твердых осадков с устраненными систематическими погрешностями и их линейные тренды для станций, расположенных в различных районах Западной Сибири, представлены на рис. 1.

На рис. 2 представлена карта с нанесенными условными обозначениями статистически значимых и незначимых трендов по станциям, данные которых использовались для расчетов. Число статистически значимых положительных трендов составляет 19 %, значимых отрицательных – 33 % и незначимых 48 %.

На севере и юге Западной Сибири, за исключением территории Алтайского края, наблюдается увеличение годового количества твердых осадков на 20–50 мм, а в центральной части Западной Сибири, напротив, уменьшение на ту же величину. В Алтайском крае наблюдается уменьшение годового количества твердых осадков на 50–70 мм.

Для выявления связи изменений годовых сумм твердых осадков в холодный период года с изменениями температуры воздуха в период выпадения твердых осадков были получены временные ряды температуры

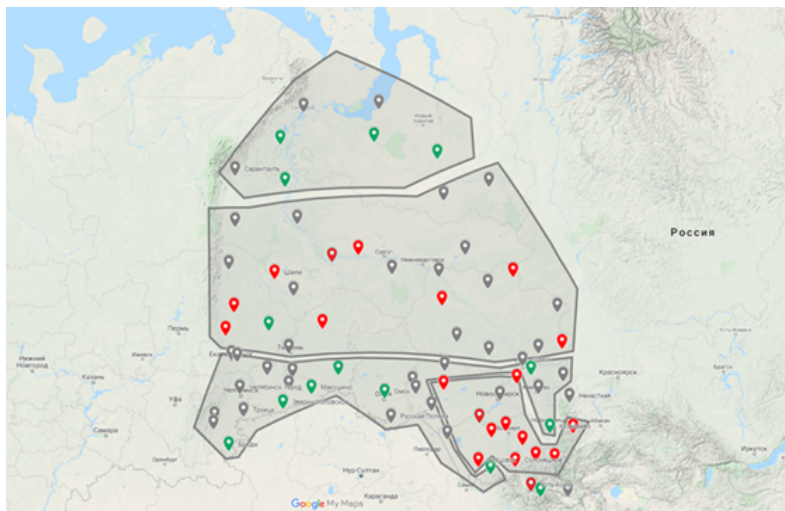


Рис. 2. Распределение статистически значимых и незначимых трендов временных изменений количества твердых атмосферных осадков по станциям Западной Сибири:

📍 – станции со значимыми отрицательными трендами; 📍 – станции со значимыми положительными трендами; 📍 – станции с незначимыми трендами

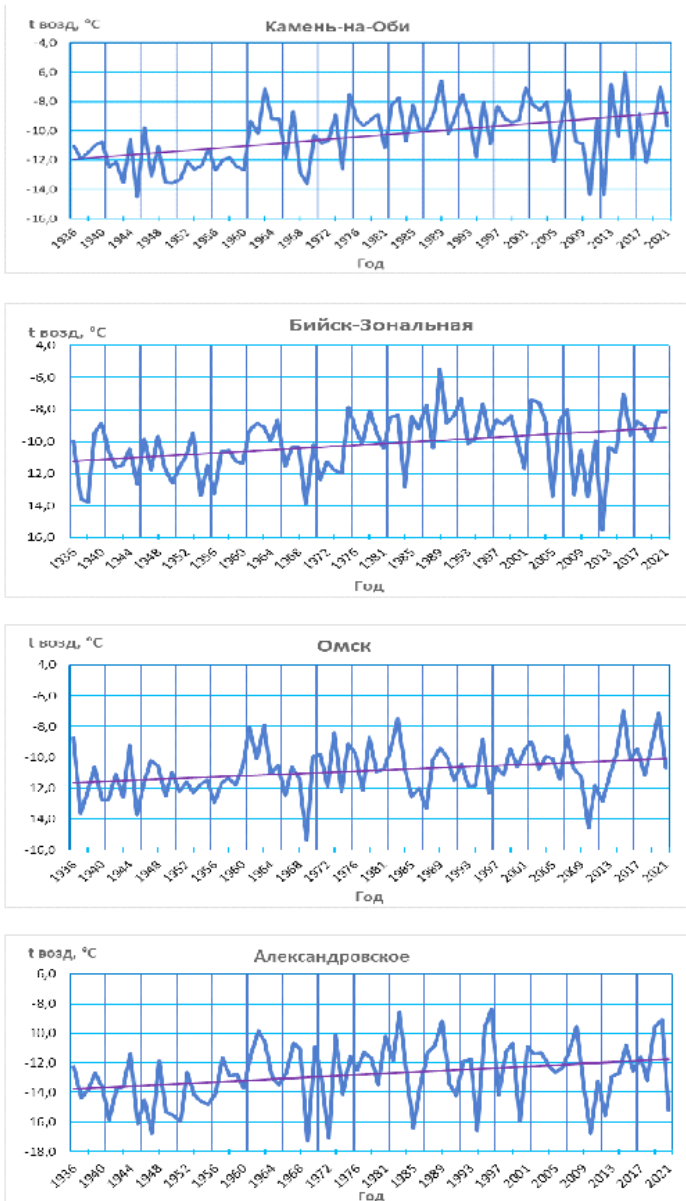


Рис. 3. Временные ряды температуры воздуха в период выпадения твердых осадков и их линейные тренды для станций Камень-на-Оби, Бийск Зональная, Омск и Александровское с 1936 по 2021 г.

воздуха в период выпадения твердых осадков, рассчитаны коэффициенты линейных трендов температуры воздуха и выполнена оценка их статистической значимости.

Примеры временных рядов температуры воздуха в период выпадения твердых осадков и их линейные тренды представлены на рис. 3.

На станциях Камень-на-Оби и Бийск Зональная, расположенных в Алтайском крае, тренды временных рядов температуры воздуха в период выпадения твердых осадков – значимые. Для других двух станций: станции Омск, расположенной в Омской области, и станции Александровское, находящейся в Томской области, – тренды незначимые.

В целом оценка статистической значимости трендов температуры воздуха в период выпадения твердых осадков показала отсутствие значимого роста или понижения температур на всей территории Западной Сибири, за исключением территории Алтайского края, где положительные тренды оказались значимы. Аномальный рост зимних температур на территории Алтайского края подтверждается и специалистами ИГКЭ [14].

Сопоставление изменений годовых сумм твердых осадков в холодный период года и изменений температуры воздуха в период выпадения твердых осадков выявило, что увеличение их годового количества и, соответственно, доли твердых осадков, а также их уменьшение на территории Западной Сибири, за исключением Алтайского края, с изменением температуры не связаны, а объясняются их внутригодовой изменчивостью, обусловленной атмосферной циркуляцией и местными физико-географическими условиями.

Выводы

На основе архива срочных сумм осадков с устраненными систематическими погрешностями для территории Западной Сибири были получены скорректированные годовые суммы осадков, средние многолетние суммы осадков, а также годовые и средние многолетние суммы осадков разных видов: жидких, твердых, смешанных.

Влияние корректировки наиболее существенно для твердых осадков, количество которых на 40–50 % больше измеренного, так как на их измеряемое количество существенно влияет скорость ветра.

В результате корректировки количества измеренных осадков произошло закономерное перераспределение доли твердых, смешанных и жидких осадков в их годовом количестве. Для станций всех трех регионов доля твердых осадков увеличилась на 5 % вследствие их выдувания. Доля скорректированных жидких осадков, соответственно, повсеместно уменьшается.

На основании сформированных однородных временных рядов твердых осадков рассчитаны характеристики линейных трендов за исследуемый период с оценкой их статистической значимости. Корректировка осадков приводит к изменению временных трендов исправленного количества осадков по сравнению с измеренными: значения положительных трендов уменьшаются, а отрицательных увеличиваются по абсолютному значению, т. е. рост осадков ослабевает, а падение усиливается.

Оценка статистической значимости трендов температуры воздуха в период выпадения твердых осадков позволила сделать вывод о том, что увеличение годовых сумм твердых осадков, а также их уменьшение на территории Западной Сибири связано с их внутригодовой изменчивостью, за исключением территории Алтайского края, где отмечается аномальный рост температур и, соответственно, значимое уменьшение годового количества твердых осадков.

Признательность

Автор благодарит заведующую методическим отделом ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова» канд. геогр. наук Светлану Юрьевну Гаврилову за советы и ценные замечания при работе над данной статьей.

Литература

1. Доклад о научно-методических основах для разработки стратегий адаптации к изменениям климата в Российской Федерации (в области компетенции Росгидромета). Санкт-Петербург, 2020. 120 с.
2. *Богданова Э.Г.* Исследование ветровой погрешности измерения осадков // Труды ГГО. 1966. Вып. 195. С. 40–62.
3. *Голубев В.С.* Изучение точности учета атмосферных осадков // Труды ГГИ. 1969. Вып. 176. С. 149–164.
4. *Дроздов О.А., Зубенко Л.И., Нечаев И.Н.* Погрешности учета атмосферных осадков // Труды ГГО. 1965. Вып. 175. С. 24–30.
5. *Струзер Л.Р., Нечаев И.Н., Богданова Э.Г.* Систематические погрешности измерения атмосферных осадков // Метеорология и гидрология. 1965. № 10. С. 50–54.
6. *Голубев В.С.* Методика корректировки срочных и месячных величин атмосферных осадков и результаты ее поверки // Труды ГГИ. 1973. Вып. 207. С. 11–27.
7. Вопросы методики измерения атмосферных осадков / Под ред. Л.Р. Струзера // Труды ГГО. Вып. 215. Гидрометеиздат, 1968. 164 с.
8. Вопросы методики измерения атмосферных осадков / Под ред. Л.Р. Струзера, Д.П. Беспалова // Труды ГГО. Вып. 195. Гидрометеиздат, 1966. 222 с.
9. *Струзер Л.Р., Нечаев И.Н., Богданова Э.Г., Федорова Е.А.* Методика корректировки многолетних норм осадков // Метеорология и гидрология. 1965. № 11. С. 43–50.

10. *Богданова Э.Г., Голубев В.С., Ильин Б.М., Драгомилова И.В.* Новая модель корректировки измененных осадков и ее применение в полярных районах РФ // *Метеорология и гидрология*. 2002. № 10. С. 68–93.
11. *Богданова Э.Г., Ильин Б.М., Драгомилова И.В.* Опыт применения усовершенствованной методики корректировки суточных сумм осадков в различных климатических условиях // *Труды ГГО*. 2003. Вып. 551. С. 23–50.
12. *Голубев В.С., Коновалов Д.А., Богданова Э.Г., Ильин Б.М.* Полная модель корректировки осадкомерных данных; методика и алгоритм оценки систематических составляющих погрешности // *WMO, Report № 74. WMO/TD*. 2000. № 1028. P. 136–139.
13. *Богданова Э.Г., Гаврилова С.Ю.* Устранение неоднородности временных рядов осадков, вызванной заменой дождемера с защитой Нифера на осадкомер Третьякова // *Метеорология и гидрология*. 2008. № 8. С. 87–102.
14. Ежегодный «Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/> (дата обращения 05.06.2023).
15. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1008 с.
16. Третий оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2022. 676 с.
17. *Поляк И.И.* Методы анализа случайных процессов и полей в климатологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 255 с.
18. *Калинин Г.П., Левин А.Г.* К вопросу об учете атмосферных осадков // *Труды ГГО*. 1965. Вып. 175. С. 67–75.
19. *Богданова Э.Г., Ильин Б.М., Гаврилова С.Ю.* Оценка влияния защищенности установки осадкомера на величину ветровой погрешности измерения осадков // *Метеорология и гидрология*. 2006. № 10. С. 92–101.

НИЗКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА НА ТЕРРИТОРИИ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ В УСЛОВИЯХ ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА

Е.В. Максютлова, Л.Б. Башалханова

*ФГБУН «Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН»,
Иркутск*

В современных климатических условиях периода последних десятилетий (1991–2020 гг.) на территории Иркутской области сохраняются резкие погодные контрасты в температуре зимних сезонов на фоне общей положительной тенденции. Они обусловлены частой повторяемостью температуры воздуха ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, при которых возрастает опасность для здоровья человека и его хозяйственной деятельности.

По данным наблюдений за температурой воздуха на сети Росгидромета на рассматриваемой территории установлена пространственно-временная дифференциация повторяемости числа дней с низкими минимальными (ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$), низкой средней суточной (ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$) температурами воздуха и повторяемостью опасного явления «сильный мороз» за последние тридцать лет (1991–2020 гг.). Особенности их распределения отражают сохранение значительной суровости зимних сезонов в районах Крайнего Севера (80–100 дней с минимальной температурой воздуха ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$; 30–50 дней с минимальной температурой воздуха ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) и местностей, приравненных к Крайнему Северу (10–60 дней с минимальной температурой воздуха ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2–20 дней с минимальной температурой воздуха ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$), а также в северо-западном и северо-восточном районах остальной территории Иркутской области (50 дней с минимальной температурой воздуха ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$; 10 дней с минимальной температурой воздуха ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$). На юге области число дней с минимальными температурами воздуха ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ снижается до 4–7 дней, а минимальные температуры воздуха ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ отмечаются редко – до 2 дней.

Наибольшая повторяемость погодных условий, достигающих критериев опасного явления «сильный мороз» (с минимальными температурами воздуха ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$), характерная для районов Крайнего Севера, отмечается практически ежегодно, от 1 до 5 случаев ОЯ за зиму на ст. Ербогачен при понижении температуры ниже $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, а максимальный непрерывный период составил 36 дней (в январе 2001 г.).

Средняя суточная температура воздуха ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ отражает основные особенности пространственного варьирования низких температур и свидетельствует о сохранении значительной суровости зимних сезонов. Ориенти-

ровочная оценка влияния низких температур ($-30\text{ }^{\circ}\text{C}$) на выполнение работ на открытом воздухе показала снижение индекса доходности за 10 рабочих дней на 3,2 % при условии безветрия, за 90 рабочих дней – на 25,5 %. Таким колебаниям подвержена вся территория Иркутской области в зависимости от суровости зимы и пространственно-временной дифференциации числа дней с низкими температурами воздуха.

Характерная особенность суровости климата Сибири требует в дальнейшем оценки опасности низких температур воздуха по категориям (интенсивности, распространенности по территории и продолжительности воздействия). Это позволит разработать адаптационные меры к изменению климата Сибири по защите здоровья населения и планированию устойчивого территориального развития.

***Ключевые слова:** изменения климата, число дней, низкие температуры воздуха, повторяемость опасного явления «сильный мороз», индекс доходности.*

LOW AIR TEMPERATURES AT THE TERRITORY OF THE IRKUTSK REGION UNDER CONDITIONS OF CLIMATE WARMING

E. V. Maksyutova, L. B. Bashalkhanova

Sochava Institute of Geography, SB RAS, Irkutsk

In the modern climatic conditions of the last decades of 1991–2020, sharp weather contrasts in the temperature of the winter seasons persist on the territory of the Irkutsk region against the background of a general positive trend. They are caused by the frequent recurrence of air temperatures below -30 , below $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, at which the danger to human health and economic activity increases.

According to observations of air temperature on the Roshydromet network in the territory under consideration, a spatiotemporal differentiation of the frequency of the number of days with low minimum (below $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ and below $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$), low average daily (below $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$) air temperatures and the frequency of the dangerous phenomenon of severe frost over the past thirty years 1991–2020 has been established. The peculiarities of their distribution reflect the preservation of significant severity of winter seasons in the Far North (80–100 days with a minimum air temperature below $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$; 30–50 days with a minimum air temperature below $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) and areas equated to the Far North (10–60 days with a minimum air temperature below $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2–20 days with a minimum air temperature below $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$), as well as in the north-western and north-eastern regions of the rest of the Irkutsk region (50 days with a minimum air temperature below $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$; 10 days with a minimum air temperature below $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$). In the south of the region, the number of days with minimum air temperatures below $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ decreases to 4–7 days, and minimum air temperatures below $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ are rarely observed – up to 2 days.

The greatest frequency of weather conditions that reach the criteria of a dangerous phenomenon, severe frost (with minimum air temperatures below -40°C), characteristic of the regions of the Far North, is observed almost annually, from 1 to 5 cases per winter at Yerbogachen station when the temperature drops below -50°C , and the maximum continuous period was 36 days (in January 2001).

The average daily air temperature below -30°C reflects the main features of the spatial variation of low temperatures and indicates the preservation of significant severity of winter seasons. An approximate assessment of the impact of low temperatures (-30°C) on the performance of outdoor work showed a decrease in the profitability index for 10 working days by 3.2 %, provided there is no wind, for 90 working days – by 25.5 %. The entire territory of the Irkutsk Region is subject to such fluctuations, depending on the severity of winter and the spatio-temporal differentiation of the number of days with low air temperatures.

A characteristic feature of the severity of the Siberian climate requires further assessment of the danger of low air temperatures by category (intensity, prevalence across the territory and duration of exposure). This will make it possible to develop adaptation measures to climate change in Siberia to protect public health and plan sustainable territorial development.

Key words: climate change, number of days, low air temperatures, frequency of the dangerous phenomenon of severe frost, profitability index.

Введение

В связи с современными изменениями климата, проявляющимися в росте приземной температуры воздуха, следует отметить большие межгодовые колебания температур воздуха, что сопровождается проявлением экстремально низких или экстремально высоких температур [1–4]. При построении долгосрочных стратегий государственного планирования различных отраслей экономики важно учитывать влияние глобального потепления на хозяйственную деятельность человека, особенно в климатически зависимых отраслях экономики с учетом географических особенностей России [5].

В погодных условиях зимних сезонов, когда температура воздуха опускается ниже -30°C , ниже -40°C , возрастают риски для здоровья человека и его хозяйственной деятельности. Влияние осуществляется через пороговые значения интенсивности и продолжительности метеопараметров.

В качестве пороговых значений могут выступать как медленно меняющиеся показатели термического режима, но имеющие важное хозяйственное значение: суммы средней суточной температуры воздуха ниже -5°C , так и экстремальные минимальные температуры воздуха. Эти показатели оказывают влияние на характер и интенсивность природных процессов и вносят существенные коррективы в жизнедеятельность человека:

условия труда и отдыха людей на открытом воздухе, эксплуатацию техники, зданий и сооружений и т. д.

При выполнении работ на открытом воздухе при низких температурах у человека уже через 1 ч наступает тепловое состояние, близкое к предельному, возрастает опасность обморожений. Согласно методическим рекомендациям МР 2.2.7.2129-06.2.2.7 [6], деятельность человека на морозе защищена гигиеническими требованиями к режиму работ. Продолжительность непрерывного пребывания на холоде снижается, а число 10-минутных перерывов на обогрев растет с понижением температуры воздуха. При $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ предусмотрено восемь перерывов на обогрев через каждые 46 мин работы на холоде в смену.

При температуре $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ существенно снижается прочность металлических и пластиковых деталей и конструкций [4]. Изготовление машин, механизмов, металлических конструкций (труб, рельсов, мостов и пр.) с учетом их прочностных и эксплуатационных свойств, снижение пластичности горюче-смазочных и полимерных материалов при низких температурах регулируются ГОСТ 15150-69 [7]. Однако отследить фактическое исполнение МР и ГОСТ крайне сложно. Повторяемость низких температур воздуха во многом определяет хозяйственную деятельность человека, их сокращение в процессе изменения климата может повлиять на условия жизнедеятельности. В исследованиях Росгидромета разрабатывается методика экономического обоснования адаптационных мероприятий к изменениям и изменчивости климата [8], но в большей мере они пока коснулись опасных явлений погоды (грозы, града, ливней, интенсивных осадков и пр.).

Географическое положение Предбайкалья (в административном делении это Иркутская область) почти в центре Евро-Азиатского континента, значительная широтная протяженность (от 52 до 61° с.ш.), сложный рельеф с окаймлением с юго-запада, юга и востока горными системами (Восточного Саяна и Хамар-Дабана, Приморского и Байкальского хребтов, Северо-Байкальского и Патомского нагорий) создают предпосылки для формирования резко континентального климата с существенными пространственными различиями. Особенностью формирования термического режима является усиление суровости зимы к северу и северо-востоку Иркутской области, а также в межгорных понижениях и долинах. Как было выявлено ранее, повышение температуры воздуха зимой происходит за счет сокращения числа дней с низкими температурами (числа дней с температурой воздуха -25 , -30 , $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже) [9]. Наибольшее снижение числа дней со среднесуточной температурой ниже $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ отмечается в южной части Предбайкалья.

В вопросах жизнеобеспечения населения по совокупности климатических и социально-экономических факторов выделены районы Крайнего

**Отклонения средних месячных температур воздуха
в зимние месяцы за 1991–2020 гг. по отношению к 1961–1990 гг.
на территории Иркутской области**

Районы	Станция	X	XI	XII	I	II	III	IV
Крайнего Севера	Наканно	0,9	1,3	-0,1	2,0	3,1	1,7	2,1
	Ербогачен	1,6	0,8	-0,1	2,2	3,6	2,0	2,2
Приравненные к районам Крайнего Севера	Мамакан	0,9	0,1	-0,9	1,1	4,3	2,1	1,6
	Киренск	1,2	0,2	-0,5	1,4	4,5	2,5	2,0
	Братск	1,3	0,2	0,5	1,1	2,7	1,9	1,9
Остальные:								
Северо-западные Западные	Червянка	1,6	0,3	0,8	1,5	3,6	2,4	2,2
	Тайшет	1,4	0,5	0,8	1,2	3,1	2,2	2,2
	Тулун	1,1	0,5	0,5	0,7	2,3	1,8	2,1
Северо-восточные	Жигалово	1,0	0,5	0,3	2,0	3,6	2,8	2,2
Юго-восточные	Иркутск	1,1	0,9	0,7	1,1	2,6	1,9	2,1
	Большое Голоустное	0,8	0,4	0,6	0,9	2,3	1,4	1,6
Юго-западные	Хамар-Дабан	0,5	-0,2	0,0	-0,1	1,8	1,3	1,8

Севера и местности, приравненные к районам Крайнего Севера [10]. Наиболее обширными по площади и контрастности температурного режима являются остальные территории, среди которых условно можно выделить северо-западные, западные, северо-восточные, юго-восточные, юго-западные (см. таблицу).

Цель работы – в связи с современными изменениями климата при потеплении зимних сезонов показать сохранение суровости климата на территории Иркутской области. Для достижения поставленной цели проведен анализ повторяемости числа дней с низкими температурами воздуха и выявлены особенности проявления опасного явления «сильный мороз» за период последних десятилетий (1991–2020 гг.) в районах Иркутской области. Влияние числа дней с низкими температурами на жизнедеятельность населения определяется на основании изменения индекса доходности при выполнении работ на открытом воздухе.

Материалы и методы

Наблюдаемые изменения температуры воздуха в зимние месяцы за период последних десятилетий (1991–2020 гг.) по отношению к предыдущему многолетнему периоду 1961–1990 гг. анализировались по данным среднемесячной температуры воздуха на 22 станциях [11].

Число дней со средней суточной температурой воздуха ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, с минимальной температурой воздуха ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ были

получены по данным наблюдений за ежедневной температурой воздуха на 22 станциях за период последних трех десятилетий (1991–2020 гг.) [12]. Определены средние повторяемости числа дней с низкими температурами воздуха за тридцать лет (ед./год).

В Иркутской области мороз считается очень сильным и относится к опасным явлениям (ОЯ) погоды, если с ноября по март минимальная температура воздуха ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ удерживается в течение пяти суток и более.

Исходными данными опасного явления «сильный мороз» за 1991–2020 гг. послужили ежедневные наблюдения на семи метеорологических станциях территорий Крайнего Севера (ст. Ербогачен); местностей, приравненных к районам Крайнего Севера (ст. Киренск, Мамакан, Братск), и остальных территорий области – юго-восточных (ст. Иркутск-обсерватория, Большое Голоустное), западных (ст. Тайшет) [12].

Под влиянием низких температур повышаются риски для населения и объектов инфраструктуры. Ранее для ориентировочной оценки ресурсов климата регионов Восточной Сибири [13] и Сибири в целом [14] для жизнедеятельности населения была применена расчетная схема зависимости индекса доходности от числа нерабочих дней в зонах разной дискомфортности. Представляется, применение этой расчетной схемы в упрощенном виде возможно и для оценки влияния числа дней с низкими температурами на индекс доходности при выполнении работ на открытом воздухе. В агрегированном виде зависимость имеет вид:

$$V_i = f(A) \cdot (T - T_i) \cdot N,$$

где V_i – индекс доходности; i – температура воздуха ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, при $i = 0$ работы ведутся в благоприятных условиях; $f(A)$ – удельная эффективность рабочей деятельности; T – число рабочих дней в году; T_i – число дней в году с температурой воздуха ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, при которых работы на открытом воздухе ограничены; N – число работников.

Решение этой схемы при переменной T_i позволяет получить ориентировочное представление о влиянии низких температур на индекс доходности.

Результаты и обсуждение

На территории Иркутской области изменения температуры воздуха, наблюдаемые в зимние месяцы за период последних десятилетий (1991–2020 гг.) по отношению к предыдущему многолетнему периоду 1961–1990 гг., показывают рост температуры воздуха (см. таблицу), но при этом выявлено понижение температуры воздуха в декабре на некоторых станциях, относящихся к местности, приравненной к районам Крайнего Севера: $-0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ст. Мамакан); $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ст. Киренск).

Эти же станции отличаются наиболее заметными положительными отклонениями температуры воздуха в феврале (до 4,5 °С). На всей остальной территории отклонения так же максимальны за сезон и изменяются от 1,8 °С в юго-западных районах (ст. Хамар-Дабан) до 3,6 °С в северо-восточных (ст. Жигалово) и северо-западных (ст. Червянка) районах иных территорий и на Крайнем Севере (ст. Ербогачен).

В январе наибольшие положительные отклонения температуры воздуха отмечаются в районах Крайнего Севера (2,0–2,2 °С) и северо-восточных районах, где особенности рельефа межгорных понижений (ст. Жигалово) способствуют интенсивному стоку холодного воздуха со склонов в низины. В марте и апреле на большей части территории Иркутской области также отмечаются высокие положительные отклонения температуры воздуха, достигающие 2 °С и более.

Такие заметные положительные отклонения зимних температур обусловлены пространственно-временным распределением среднего числа дней с низкими минимальными и средними за сутки температурами воздуха.

Низкие минимальные температуры воздуха характеризуют наиболее холодную часть суток и в большей степени зависят от местоположения станции (от формы рельефа, высоты над уровнем моря). На станциях, расположенных в котловинах и долинах, отмечаются самые низкие минимумы.

В районах Крайнего Севера (ст. Ербогачен, Наканно) понижение минимальной температуры воздуха ниже –30 °С отмечается с октября по апрель, средняя повторяемость составляет 78–96 дней в год. В октябре и апреле таких дней немного (в среднем 1–2 дня), их количество возрастает к декабрю–январю до 20–24 дней (рис. 1).

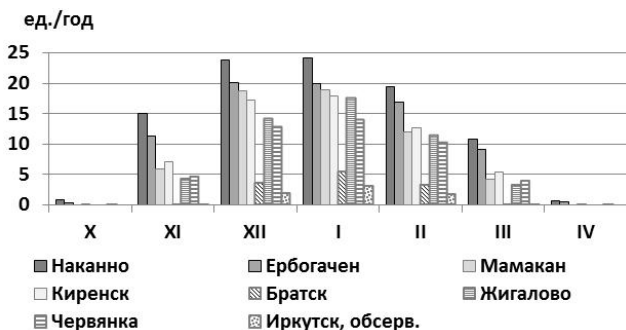


Рис. 1. Средняя повторяемость числа дней с минимальной температурой воздуха ниже –30 °С по месяцам за период 1991–2020 гг. на территории Иркутской области

На территориях, приравненных к районам Крайнего Севера, с ноября по март число дней с минимальной температурой воздуха ниже -30°C составляет 13–61 день, с наибольшими величинами в декабре–январе от 6 на ст. Братск до 18–19 дней на ст. Киренск, Бодайбо.

На остальной территории такие температуры воздуха часто наблюдаются в межгорных долинах (ст. Жигалово, 51 день) и в северо-западных районах (ст. Червянка, 46 дней). Их число снижается к югу территории: 7 дней (ст. Иркутск, обсерв.), 5 дней (ст. Хамар-Дабан), 4 дня (ст. Большое Голоустное).

Если температура воздуха продолжает понижаться, то условия работ на открытом воздухе существенно ухудшаются. Согласно методическим рекомендациям [5] при температуре воздуха -40°C продолжительность непрерывного пребывания на открытом воздухе сокращена до 35 мин в условиях безветрия и до 22 мин при скорости ветра 10 м/с. Соответственно предусмотрено повышение числа 10-минутных перерывов на обогрев.

В районах Крайнего Севера с ноября по март минимальные температуры воздуха ниже -40°C в сумме составляют 32–47 дней, с максимальным количеством в январе – 11–15 дней. В сезонном ходе характерен их резкий рост от ноября к декабрю и снижение от февраля к марту. Так, на ст. Ербогачен в среднем количество дней за холодный период нарастает и снижается следующим образом: от 3 дней в ноябре, 10 дней в декабре, 11 – в январе, 7 дней в феврале и 2 дня в марте. В отдельные годы число дней с температурой воздуха ниже -40°C достигает 29 (декабрь 2000 г. на ст. Ербогачен).

На территориях, приравненных к районам Крайнего Севера, число дней с минимальными температурами воздуха ниже -40°C колеблется от 1,5 (ст. Братск) до 19 дней (ст. Киренск), с повышением в отдельные годы до 21 (декабрь 2009 г., ст. Мамакан), 20 дней (декабрь 2009 г., ст. Киренск). На остальных территориях самыми холодными остаются северо-западные (ст. Червянка), северо-восточные (ст. Жигалово) районы, где число дней с минимальной температурой ниже -40°C достигает 10 дней.

На юге области минимальные температуры воздуха ниже -40°C отмечаются редко – до 2 дней. В отдельные годы количество таких дней возрастает. Так, на ст. Тайшет в 2001 г. в январе таких дней было 10, при среднем многолетнем значении 1,5 дня. На ст. Иркутск-обсерватория они отмечались 8–9 января 2001 г. и 2 февраля 2006 г.; на ст. Большое Голоустное – 9 января 2001 г.

Риски для хозяйственной деятельности и для человека возрастают при погодных условиях, достигающих критериев опасного явления. На территории Предбайкалья за последние 30 лет (1991–2020 гг.) сильные морозы, когда минимальная температура воздуха ниже -40°C удерживается в течение пяти суток и более, отсутствуют в юго-восточных районах

области (ст. Иркутск, Большое Голоустное). Они редки в западных районах области. Так, за последние 30 лет сильные морозы устанавливались в Тайшете в январе 2000 г. (5 дней, до $-45,6^{\circ}\text{C}$) и 2001 г. (9 дней, до $-48,5^{\circ}\text{C}$). Безусловно, северо-западные и северо-восточные районы (ст. Червянка, Жигалово) будут отличаться наибольшей суровостью в своей зоне.

На территориях, приравненных к районам Крайнего Севера, такие погодные условия наблюдались минимальное количество раз в Братске – в январе 2001 г. в течение 12 дней с понижением температуры до $-45,9^{\circ}\text{C}$ и в конце января–начале февраля (5 дней) с понижением температуры до $-43,3^{\circ}\text{C}$. В Киренске сильные морозы отмечались по 6 раз в десятилетия 1991–2000 гг. и 2001–2010 гг. и 4 раза в последнее десятилетие, 2011–2020 гг. Наибольшей длительности опасное явление достигало в 2001 г. (17 дней) с понижением температуры воздуха до -53°C и в 2010 г. (15 дней) с понижением температуры воздуха до $-48,7^{\circ}\text{C}$. На ст. Мамакан сильные морозы устанавливались 5–6 раз за десятилетие с понижением минимальной температуры до $-48,9^{\circ}\text{C}$. При этом наибольшая длительность периода с температурами воздуха ниже -40°C составляла 21 день (в 2009 г.).

Наибольшая повторяемость опасного явления «сильный мороз» характерна для районов Крайнего Севера. На ст. Ербогачен сильные морозы наблюдаются практически ежегодно. С конца декабря до начала февраля такие погодные условия устанавливаются по несколько раз за сезон (от 1 до 5). В 2014 г. 5 раз отмечалось ОЯ «сильный мороз». Температура воздуха может понижаться ниже -50°C : в январе 1994 г. она понизилась до $-55,8^{\circ}\text{C}$. При этом длительность периода с температурами воздуха ниже -40°C может достигать 36 дней (с 13 декабря по 17 января 2001 г.).

Выраженные пространственные различия низких температур оказывают влияние и на среднесуточную температуру воздуха. Пространственно-временное распределение числа дней со средней суточной температурой воздуха ниже -30°C отражает основные особенности варьирования низких температур, рассмотренные выше.

Для районов Крайнего Севера с ноября по март отмечаются дни со средними суточными температурами ниже -30°C – в среднем 46–62, максимум в январе: 15 (Ербогачен) и 19 дней (Наканно). На территориях, приравненных к районам Крайнего Севера, с ноября по март число дней с такими температурами составляет от 7 (ст. Братск) до 32 (ст. Киренск) и 37 дней (ст. Мамакан).

На остальной территории высокая повторяемость дней со средними суточными температурами ниже -30°C отмечается в северо-восточных (ст. Жигалово, 23 дня) и северо-западных районах (ст. Червянка, 20 дней), что указывает на значительную суровость климата отдельных районов области. Их число снижается от 6–8 в западных районах до 0,5–3 дней в юго-восточных и юго-западных районах Иркутской области.

Зависимость индекса доходности от числа дней с низкими температурами воздуха покажем на простом примере решения расчетной схемы, приведенной выше. Сначала определим удельную эффективность рабочей деятельности при выполнении работ на открытом воздухе в зимний период (100 рабочих дней). Предположим, 10 рабочих при базисном доходе 1 млн руб. выполняют наружные работы при температуре воздуха, не ограничивающей пребывание на открытом воздухе. Удельная эффективность при этом составила 1000 руб./чел. С понижением температуры воздуха, согласно методическим рекомендациям [6], необходимо предоставлять 10-минутные перерывы на обогрев при $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ через каждые 46 мин. Число 10-минутных перерывов за 8-часовой рабочий день составляет 80 мин, или 1,3 ч. Снижение индекса доходности за 10 смен составит 3,2 % при условии безветрия, за 90 смен – 25,5 %. Но с усилением скорости ветра, а также с понижением температуры воздуха предусмотрен рост числа 10-минутных перерывов для обогрева и сокращение продолжительности непрерывного пребывания на холоде. При температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и скорости ветра 10 м/с предусмотрено 14 перерывов через каждые 22 мин. В связи с этим будет снижаться и индекс доходности. Необходимо отметить, что охлаждающее влияние ветра на снижение эффективности трудовой деятельности на открытом воздухе согласно методическим рекомендациям [6] начинается уже с $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Кроме того, на территориях с частой повторяемостью низких температур неизбежно возрастают издержки по жизнеобеспечению населения, объектов ЖКХ, дорожно-транспортной инфраструктуры. Возникает удорожание строительно-монтажных работ, исполнения в северном варианте деталей машин и механизмов, металлоконструкций (труб, рельсов, опор и пр.) с учетом их прочностных и эксплуатационных свойств. Горючесмазочные и полимерные материалы дополняют этот перечень.

Следовательно, в современных условиях потепления климата низкая температура воздуха ($-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже), характерная для районов Иркутской области, оказывая заметное воздействие на человека, режим его труда на открытом воздухе и на объем издержек, выступает источником опасности для жизнедеятельности населения.

Заключение

В современных климатических условиях периода последних десятилетий (1991–2020 гг.) на территории Иркутской области сохраняются низкие температуры воздуха (ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) на фоне общей положительной тенденции. Значительными изменениями температурного режима отличаются территории, приравненные к районам Крайнего Севера (ст. Мамакан, Киренск), что обусловлено наибольшим ростом темпе-

ратуры воздуха в феврале на 4,3–4,5 °С и ее заметным снижением в декабре на –0,9 °С (ст. Мамакан), –0,5 °С (ст. Киренск).

Для периода последних десятилетий (1991–2020 гг.) на территории Иркутской области установлена пространственно-временная дифференциация числа дней с низкими минимальными (ниже –30 °С и ниже –40 °С), низкой средней суточной (ниже –30 °С) температурами воздуха и повторяемостью опасного явления «сильный мороз». Выявленные особенности их распределения отражают значительную суровость зимних сезонов в районах Крайнего Севера и местностях, приравненных к ним; в северо-западном и северо-восточном районах остальной территории Иркутской области. Наибольшая повторяемость погодных условий, достигающих критериев опасного явления «сильный мороз» (с минимальными температурами воздуха ниже –40 °С), характерна для районов Крайнего Севера.

Средняя суточная температура воздуха ниже –30 °С отражает основные особенности пространственного варьирования низких температур зимних сезонов. Ориентировочная оценка влияния низких температур (–30 °С) на выполнение работ на открытом воздухе показала снижение индекса доходности за 10 рабочих дней на 3,2 % при условии безветрия, за 90 рабочих дней – на 25,5 %. Таким колебаниям низких температур подвержена вся территория Иркутской области в зависимости от суровости зимы и пространственно-временной дифференциации числа дней с низкими температурами воздуха.

Характерная особенность суровости климата Сибири требует в дальнейшем оценки опасности низких температур воздуха по категориям (интенсивности, распространенности по территории и продолжительности воздействия). Это позволит разработать адаптационные меры к изменению климата Сибири по защите здоровья населения и планированию устойчивого территориального развития.

Работа выполнена в рамках Плана НИР № АААА-А21-121012190059-5, АААА-А21-121012190018-2.

Литература

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1009 с.
2. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Научное издание технологий, 2022. 124 с.
3. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell,

- E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou (Eds.). Cambridge: Cambridge University Press, United Kingdom; New York: NY, USA, 2391 p. DOI: 10.1017/9781009157896.
4. *Кобышева Н.В., Акентьева Е.М., Галюк Л.П.* Климатические риски и адаптация к изменениям и изменчивости климата в технической сфере. СПб.: Издательство Кириллица, 2015. 214 с.
 5. *Кислов А.В., Суркова Г.В.* Влияние глобального потепления на климатические ресурсы России // Экономика. Налоги. Право. 2021. Т. 14, № 4. С. 6–14. DOI: 10.26794/1999-849X-2021-14-4-6-1.
 6. МР 2.2.7.2129-06.2.2.7. Физиология труда и эргономика. Режимы труда и отдыха, работающих в холодное время на открытой территории или в неотапливаемых помещениях. Методические рекомендации (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 19.09.2006). [Электронный ресурс]. URL: www.consultant.ru (дата обращения 12.05.2023).
 7. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. [Электронный ресурс]. URL: www.consultant.ru (дата обращения 12.05.2023).
 8. *Кобышева Н.В.* Методика экономического обоснования адаптационных мероприятий, связанных с изменениями и изменчивостью климата // Труды ГГО. 2014. № 574. С. 5–38.
 9. *Bashalkhanova L.B., Maksyutova E.V.* Influence of Temperature Variations During a Cold Period on the Conditions of Life of the Population in East Siberia // Geography and Natural Resources. 2014. Vol. 35, No. 1. P. 55–62.
 10. Постановление Правительства РФ от 16.11.2021 г. № 1946 «Об утверждении перечня районов Крайнего Севера и приравненных к районам Крайнего Севера. [Электронный ресурс]. URL: www.static.government.ru (дата обращения 12.05.2023).
 11. *Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В.* Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621485. [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных> (дата обращения 12.05.2023).
 12. *Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М.* Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (ТТТР). Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620942. [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных> <http://www.meteo.ru> (дата обращения 23.03.2023).
 13. *Корытный Л.М., Башалханова Л.Б., Башалханов И.А., Линевич Н.Л.* Оценка влияния гидроклиматических ресурсов на жизнедеятельность населения Восточной Сибири // География и природ. ресурсы. 1998. № 4. С. 44–51.
 14. *Башалханова Л.Б.* Климатический потенциал // География Сибири в начале XXI века. Т. 4. Природопользование. Новосибирск: Акад. Изд-во «Гео», 2014. С. 13–26.

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЮГО-ВОСТОКА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Л.А. Воронина¹, А.М. Лапчик², Е.А. Брусенко²

¹ФГБУ «Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт», Новосибирск

²ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС», Новосибирск

В докладе Росгидромета об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 г. отмечено: «Скорость роста среднегодовой температуры на территории Российской Федерации почти втрое превышает среднюю по земному шару, а весеннее потепление в Западной Сибири втрое быстрее, чем зимнее» [1]. Климатическим центром Росгидромета была выпущена публикация «Глобальное изменение климата и Сибирский Федеральный округ» (Санкт-Петербург, 2021), в которой представлен анализ изменения температуры воздуха и количества осадков за период 1961–2020 гг. по ряду районов Сибирского федерального округа, рассмотрены результаты роста среднегодовой температуры воздуха в округе по десятилетиям. Отмечено, что после 1976 г. рост среднегодовой температуры воздуха в Сибирском федеральном округе составляет 0,44 °С/10 лет [2]. В предлагаемой статье рассмотрены результаты исследования за период 1961–2020 гг. рядов среднегодовой температуры воздуха, среднемесячной температуры воздуха, а также годовых и месячных сумм осадков. Приведен анализ изменений температурного режима и режима осадков по отдельным территориям региона и влияние их на жизнедеятельность этих районов. Рассмотрены связи изменения температурного режима и режима осадков над юго-востоком Западной Сибири с формами атмосферной циркуляции.

Ключевые слова: изменение климата, средние многолетние значения, среднегодовая температура воздуха, суммы осадков, засушливость, формы циркуляции.

CLIMATIC FEATURES OF THE SOUTH-EAST OF WESTERN SIBERIA

L.A. Voronina¹, A.M. Lapchik², E.A. Brusenko²

¹Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute, Novosibirsk

²West-Siberian Administration for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Novosibirsk

The Roshydromet report on climate features in the Russian Federation for 2021 notes: “The rate of increase in the average annual temperature in the Russian Federation is almost three times higher than the global average, and spring warming in Western Siberia is three times faster than winter warming” [1]. The Climate Center of Roshydromet issued a publication “Global Climate Change and the Siberian Federal District” (Saint Petersburg, 2021) [2], which presents an analysis of changes in air temperature and precipitation over the period 1961–2020 for a number of regions of the Siberian Federal District and results of the growth of the average annual air temperature in the district over decades. It is noted that after 1976 the increase in the average annual air temperature in the Siberian Federal District is 0.44 °C/10 years [2]. The proposed article reviews the results of the study of series of average annual air temperature, average monthly air temperature, as well as annual and monthly total precipitation for the period of 1961–2020. An analysis of changes in the temperature and precipitation regimes for individual territories of the region and their impact on the vital activity of these areas is given. Relationships between changes in the temperature and precipitation regimes over the southeast of Western Siberia and the forms of atmospheric circulation are considered.

Key words: *climate change, long-term averages, average annual air temperature, total precipitation, aridity, circulation patterns.*

Введение

Более чем полвека прошло под знаком глобального потепления, связанного с изменением концентрации парниковых газов в атмосфере при сжигании ископаемого топлива. Важной особенностью глобального потепления является его пространственная и сезонная неоднородность. Наиболее негативные последствия изменения климата не только характеризуются повышением температуры воздуха и изменением режима осадков, но и проявляются частотой и интенсивностью опасных гидрометеорологических явлений, связанных со штормовым ветром, нередко достигающим ураганной силы, повторяемостью периодов с экстремальными температурами, высокими половодьями разрушающей силы в одних местах и ростом засушливости в других. То есть происходят климатические изменения, влияющие на социально-экономическое развитие того или иного региона страны. Урожайность сельскохозяйственных культур напрямую влияет на продовольственную программу страны; от стабильной работы гидроэлектростанций зависит энергетическая безопасность, что обуславливает качество и безопасность жизни населения страны [3].

Температурный режим и режим осадков относятся к основным метеорологическим параметрам, которые влияют на жизнедеятельность населения. Поэтому представлялось актуальным и интересным рассмотреть изменение температурного режима и режима осадков по данным станций

Западно-Сибирского УГМС за ряд 1961–2020 гг. и сравнить два тридцатилетних периода норм WMO – 1961–1990 и 1991–2020 гг.

В целях анализа изменения температуры воздуха и количества выпавших осадков за период 1961–2020 гг. были построены графики среднегодовой температуры воздуха и годового количества осадков, дополнительно были рассчитаны линейные тренды, по которым можно отследить динамику роста (положительную, отрицательную), также тенденцию изменения исследуемых метеорологических параметров.

Основными факторами, определяющими климат территории юго-востока Западной Сибири, являются ее географические особенности. Территория Западной Сибири находится внутри материка Евразия. Открытость территории Западной Сибири с севера обуславливает беспрепятственное вторжение холодного арктического воздуха, а с юга – вынос жаркого сухого воздуха из районов Средней Азии и Казахстана. Вследствие удаленности территории от морей и океанов большое влияние на формирование климата оказывают физические свойства суши, которая летом быстро и сильно нагревается, а зимой так же интенсивно охлаждается. Значительные температурные перепады между сезонами года говорят о том, что почти вся территория юго-востока Западной Сибири относится к зоне континентального климата.

К территории исследования относятся Томская, Новосибирская, Кемеровская области, Алтайский край, Республика Алтай. Для анализа режима осадков и температуры воздуха использованы данные наблюдений 124 метеорологических станций ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» (рис. 1) [4].

Регион исследования находится в трех природно-климатических зонах: Томская – лесная, таежная, Новосибирская – в основном лесостепная, Алтайский край – преимущественно зона степей. В самом юго-восточном субъекте региона – Республике Алтай (высота 2600 м над уровнем моря, вершина горы Кара-Тюрек им. Гесса) – представлены особенности горного климата [4]. Для Кемеровской области характерно разнообразие мезоклиматических условий; по природно-ландшафтным признакам область подразделяется на четыре зоны: большая часть территории представляет собой предгорную и горную зоны, почти сплошь покрытые черневой тайгой, на севере и в центре области значительные площади заняты лесостепью и степью, часть территории занята равнинной тайгой.

Так как регион исследования находится в разных природно-климатических зонах, для исследования целесообразно было выбрать станции, которые бы отражали особенности температурного режима и режим осадков своей зоны.

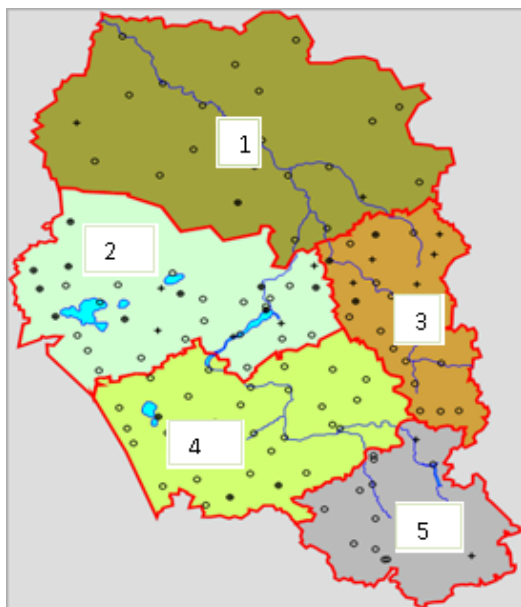


Рис. 1. Сеть метеорологических станций:

1 – Томская область (23 ст.); 2 – Новосибирская область (35 ст.); 3 – Кемеровская область (21 ст.); 4 – Алтайский край (32 ст.); 5 – Республика Алтай (10 ст.)

Температурный режим и его изменения

На рис. 2, *a–e* представлены графики хода среднегодовой температуры воздуха за период 1961–2020 гг. по данным станций, характерным для природно-климатических зон: Александровское (север), Кемерово (восток), Татарск (запад), Барнаул, Маслянино (центр), Ак-Кем (Горный Алтай).

По данным этих станций рассчитаны и линейные тренды изменения среднегодовой температуры воздуха. Визуально по распределению графика, а также по статистическим параметрам линейного тренда, хотя они и малозначимы, наблюдается положительная динамика роста среднегодовой температуры воздуха. Учитывая значительную разницу в климатических и географических условиях разных районов юго-востока Западной Сибири, в данных станций отмечаются и различия в статистических параметрах повышения среднегодовой температуры воздуха.

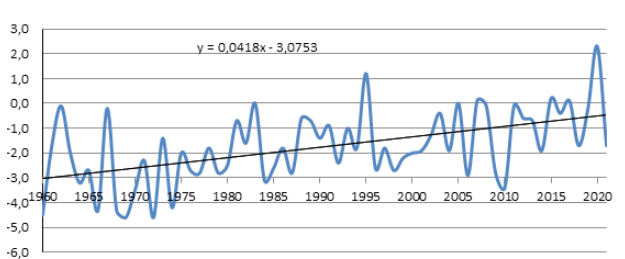
Кроме изменения среднегодовой температуры воздуха, представляет интерес рассмотреть и проанализировать изменение температуры за 60 лет в теплый (апрель–октябрь) и холодный (ноябрь–март) периоды года, а также максимальной и минимальной температуры воздуха [2]. На рис. 3

приведены примеры хода температуры воздуха и рассчитанные тренды температуры в теплый (рис. 3 – А1, А2, А3) и в холодный (рис. 3 – Б1, Б2 и Б3) периоды года по станциям Александровское, Барнаул и Кемерово. Во всех случаях и в теплый, и в холодный периоды года визуально можно наблюдать положительную динамику роста температуры воздуха. Рассчитанные уравнения линейного тренда малозначимы, но они также указывают на положительную динамику роста температуры воздуха. Если сравнивать в линейных уравнениях коэффициенты прироста во временном ряду, то следует отметить, что в холодный период наблюдается более значимый прирост температуры воздуха, чем в теплый период. Таким образом, можно предположить, что тенденция большего прироста температуры на юго-востоке Западной Сибири в течение исследуемых периодов года приходится на холодный период.

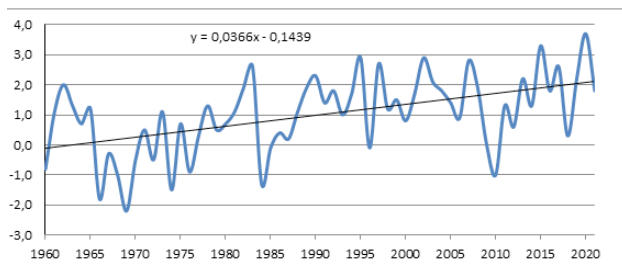
Представляло интерес рассмотреть изменение максимальной и минимальной температуры воздуха [2] за период с 1961 по 2020 г. На рис. 4, а–е приведены примеры хода максимальной и минимальной температуры воздуха. На станциях Александровское (Томская область) и Татарск (Новосибирская область) прослеживается повышение минимальной температуры воздуха (линейный тренд малозначимый, но положительный). Некоторое снижение минимальной температуры воздуха (тренд статистически малозначимый, но отрицательный) наблюдается на станциях Барнаул, Горняк (Алтайский край), Кемерово, т. е. наблюдается, хотя и небольшая, тенденция к понижению минимальной температуры воздуха. Максимальная температура воздуха по этим станциям остается почти без изменения. Однако на горных станциях Алтая (пример – станция Ак-Кем) отмечаются положительные тренды (хотя статистически малозначимые) как максимальной, так и минимальной температуры воздуха.

Тренды максимальной температуры воздуха по приведенным станциям юго-востока Западной Сибири малозначимы, хотя имеют положительный знак, т. е. отмечается небольшой прирост температуры воздуха в дневные часы. Дополнительно были проанализированы максимальные температуры воздуха летних месяцев за весь исследуемый ряд. Максимальная температура этого периода по большинству станций была близка к норме (около +25 °С) и лишь в отдельные годы (1982, 1983, 1989, 1998, 1999, 2012 и 2014) максимальная температура воздуха превышала +30 °С.

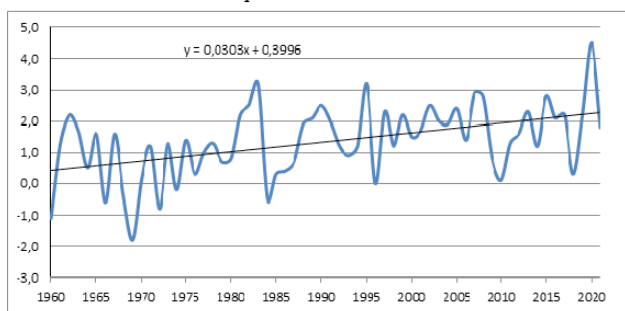
Изменение минимальной температуры носит неоднородный характер. По показаниям большинства метеостанций отмечается положительный тренд, но по ряду станций Алтайского края, Кемеровской области и востока Новосибирской области тренд минимальной температуры воздуха оказался статистически малозначимым, но отрицательным, т. е. в этих районах наблюдается тенденция к увеличению холодных зим с температурой воздуха ниже –30...–35 °С. Наиболее холодные зимы с аномальны-



а - Александровское



в - Кемерово



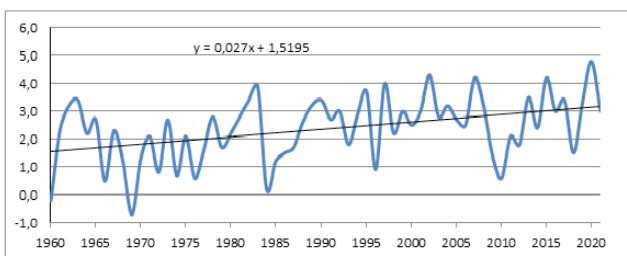
д - Татарск

Рис. 2 (начало). Среднегодовая температура воздуха (°C) по станциям Александровское (а), Барнаул (б), Кемерово (в), Ак-Кем (г), Татарск (д), Маслянино (е)

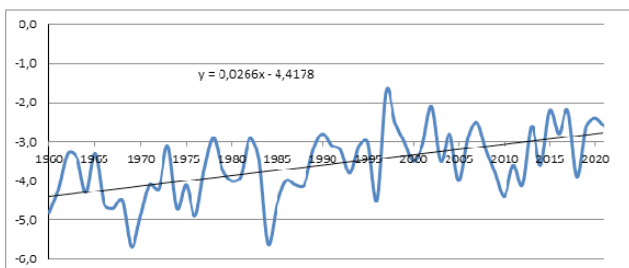
ми и продолжительными морозами наблюдались в 1984–1985, 1987–1988, 1997–1998, 2004–2005, 2005–2006, 2008–2009, 2009–2010 и 2010–2011 гг.

На основании приведенных данных можно предположить, что наиболее визуально заметная и статистически более значимая тенденция повышения годовой температуры воздуха наблюдается в северной части юго-востока Западной Сибири.

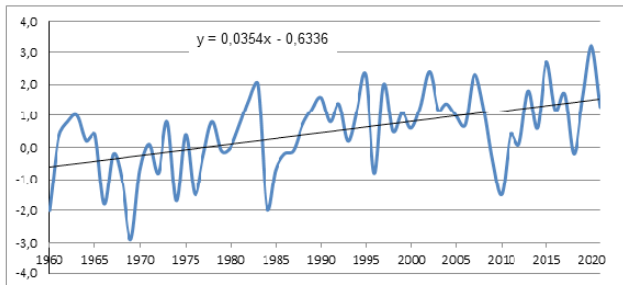
На диаграмме (рис. 5) в годовом разрезе можно сравнить интенсивность изменений за 30 лет по месяцам и по территориям. Видно, что при-



б - Барнаул



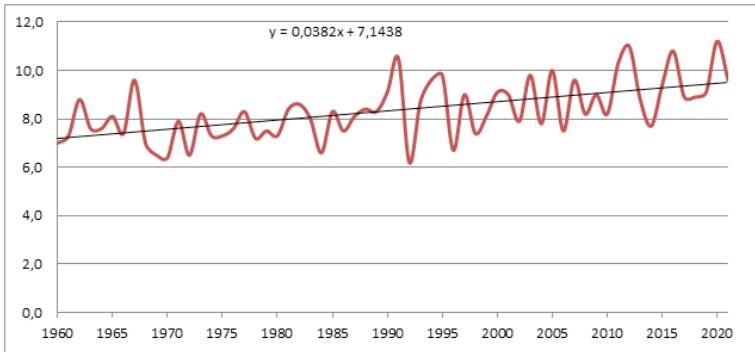
г - Ак-Кем



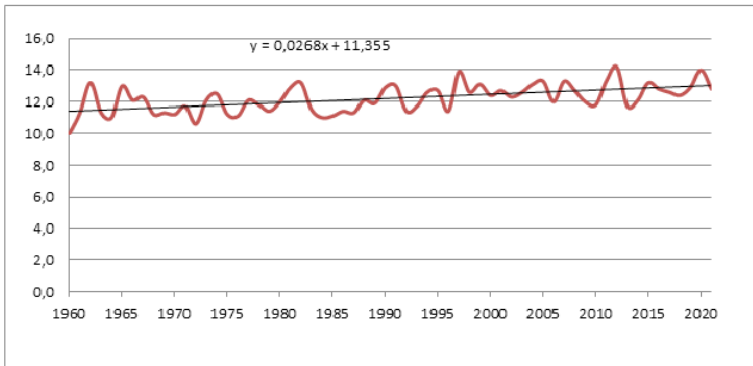
е - Маслянино

Рис. 2 (окончание)

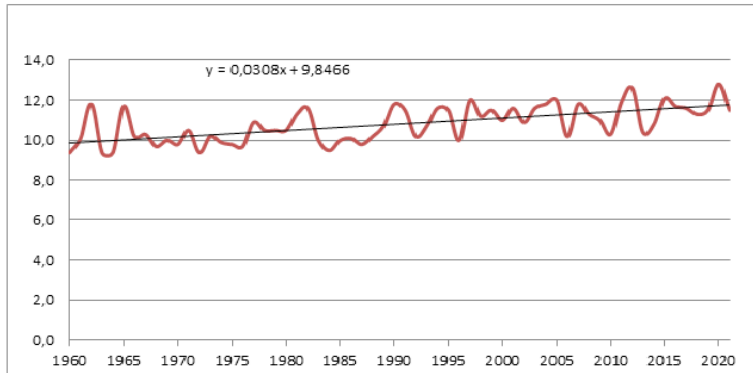
рост средней многолетней температуры воздуха по всей территории наблюдается в холодные (зимние) месяцы: ноябрь, январь, февраль, декабрь, март, а также в апреле и октябре; причем максимальный прирост нормы среднемесячной температуры воздуха в среднем отмечается по Новосибирской области в феврале, марте, апреле, мае и октябре от 1,25 до 2,5 °С. В марте по Томской, Кемеровской областям, Республике Алтай отмечается незначительный прирост температуры; в Алтайском крае в среднем по территории среднемесячная температура воздуха в марте стала ниже



А1 - Александровское, теплый период года

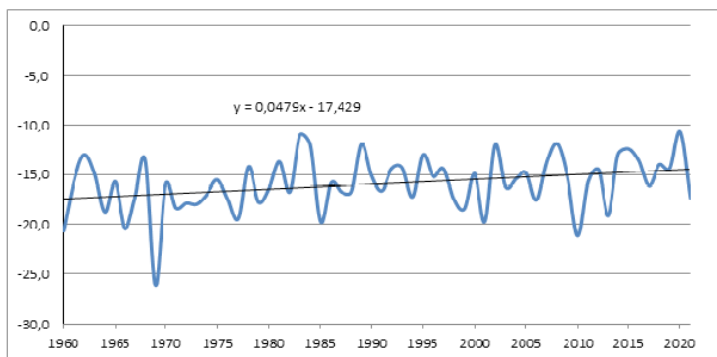


А2 - Барнаул, теплый период года

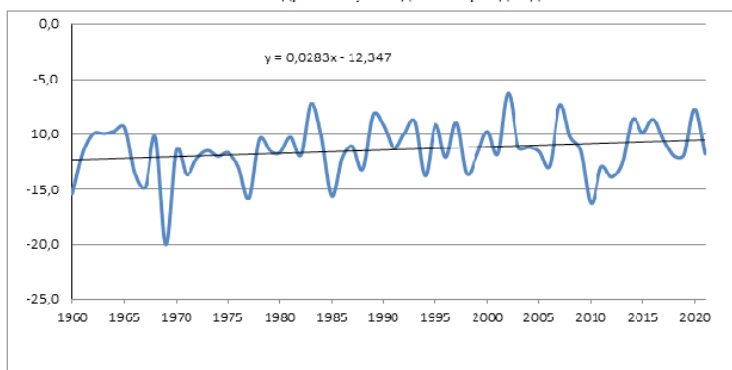


А3 - Кемерово, теплый период года

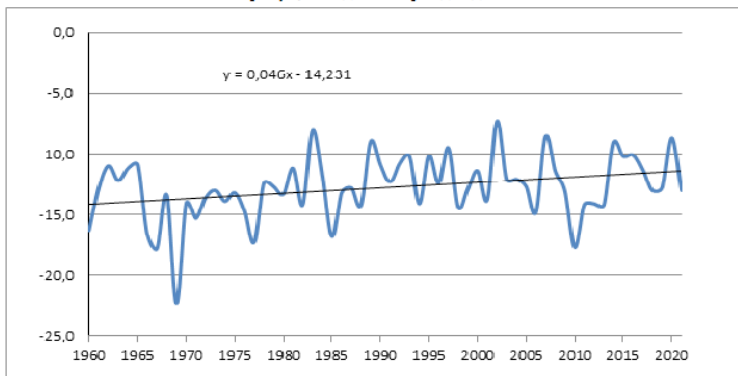
Рис. 3 (начало). Среднегодовая температура воздуха (°С) по станциям Александровское, Барнаул, Кемерово: А – в теплый период года, Б – в холодный период года



Б1 - Александровское, холодный период года

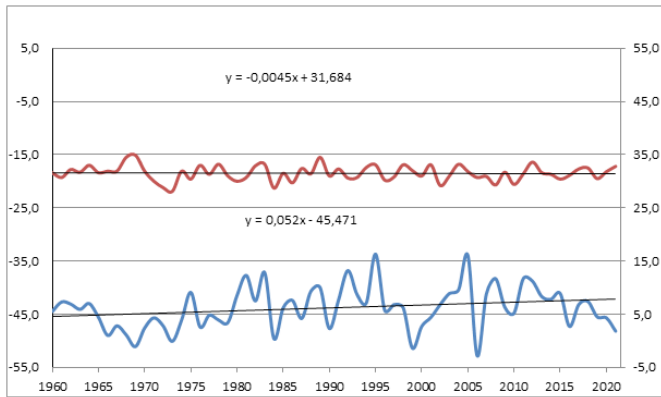


Б2 - Барнаул, холодный период года

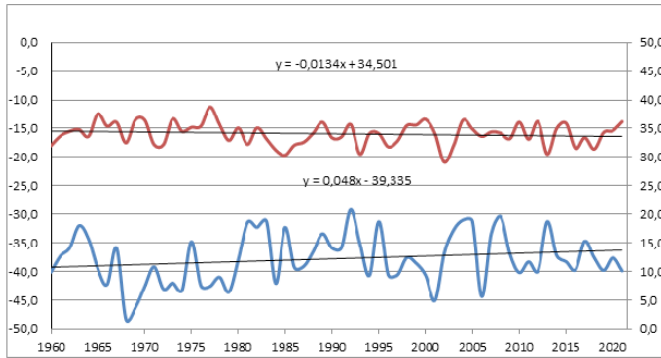


Б3 - Кемерово, холодный период года

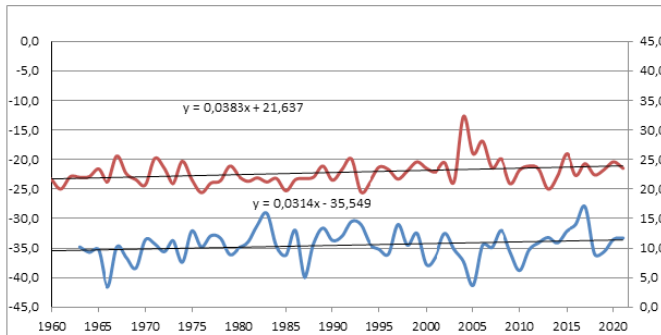
Рис. 3 (начало)



а - Александровское

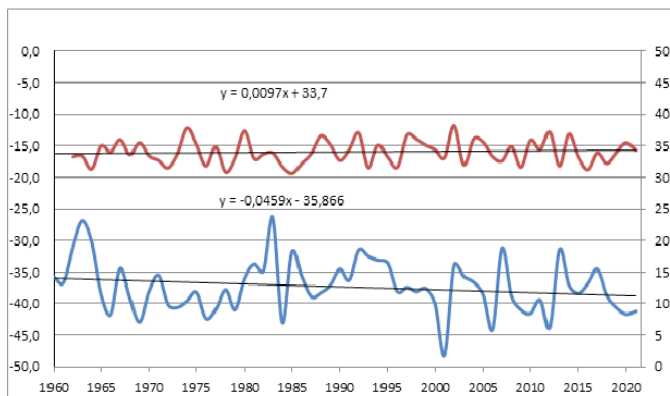


в - Татарск

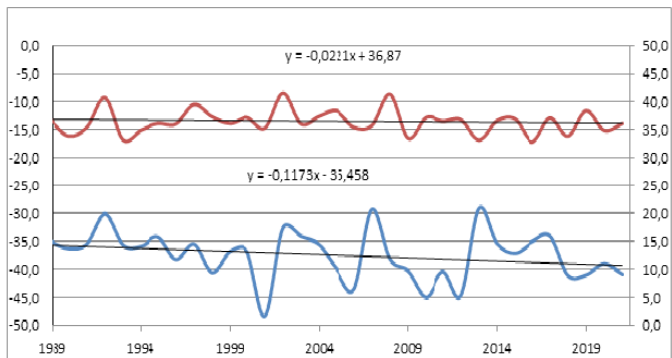


д - Ак-Кем

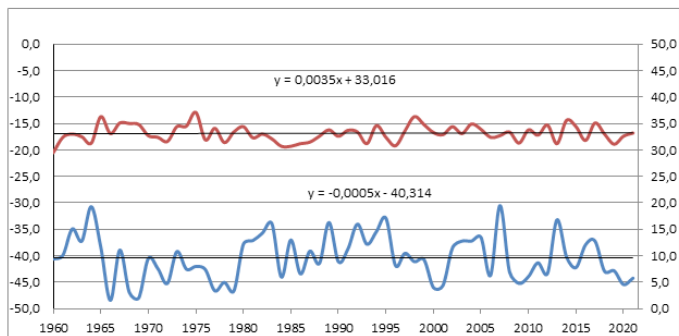
Рис. 4 (начало). Максимальная и минимальная температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$) по станциям Александровское (а), Барнаул (б), Татарск (в), Горняк (г), Ак-Кем (д), Кемерово (е)



б - Барнаул



г - Горняк



е - Кемерово

Рис. 4 (окончание)

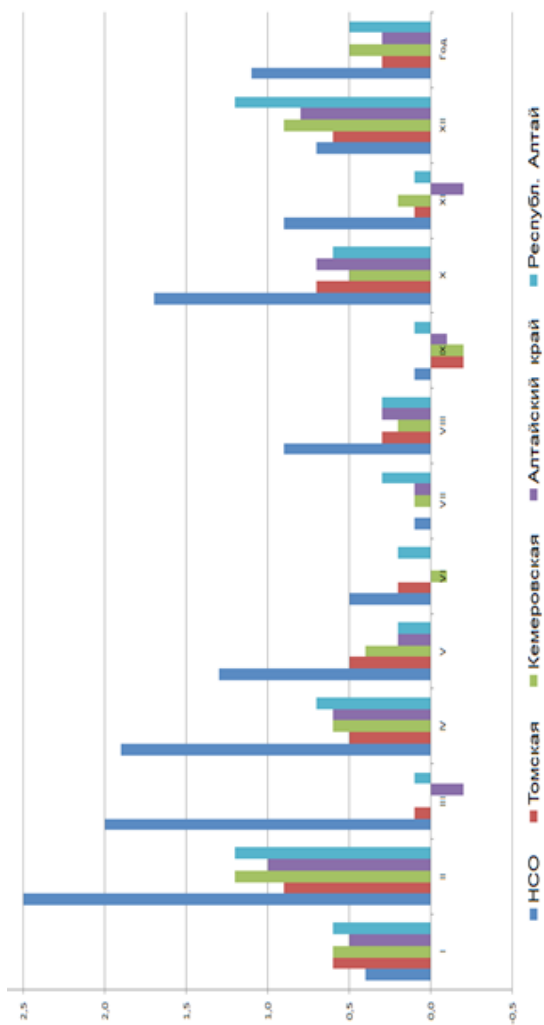


Рис. 5. Разница среднемесячной температуры воздуха в нормах 1961–1990 и 1991–2020 гг. по субъектам юго-востока Западной Сибири

на 0,2 °С, что, видимо, может говорить о частом возврате холодов, так как март здесь считается уже весенним месяцем, в отличие от Томской, Кемеровской и Новосибирской областей, где еще продолжается зима.

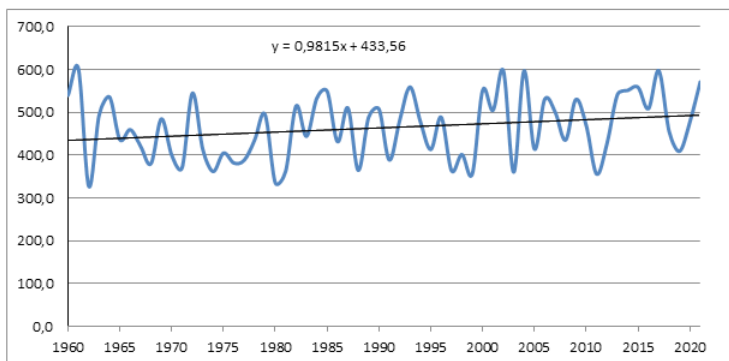
В летние месяцы средние многолетние значения температуры за период 1991–2020 гг. повысились незначительно, всего на 0,1–0,3 °С, в сентябре и ноябре изменения в нормах почти не наблюдаются. Среднегодовая температура воздуха за 30 лет, с 1991 по 2020 г., повысилась в среднем по Новосибирской области на 1 °С, на остальной территории юго-востока Западной Сибири – менее чем на 1 °С.

Режим осадков и его изменение

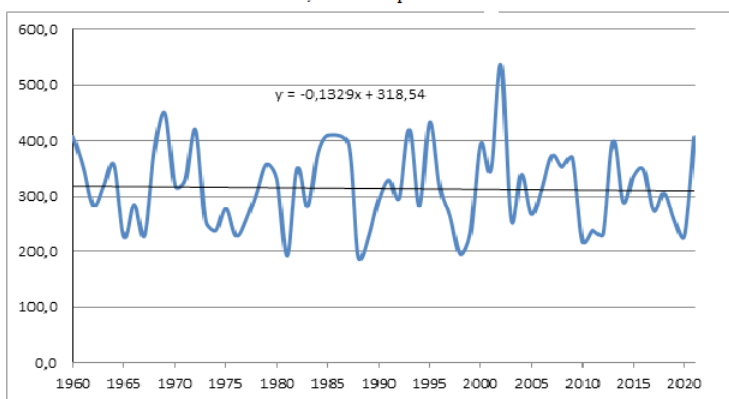
Одной из важнейших климатических характеристик являются атмосферные осадки. Распределение осадков зависит как от физико-географических особенностей региона (высоты места, формы рельефа, наличия лесных массивов, водоемов и речных долин), так и от циркуляционных факторов атмосферы.

Рассмотрим графики годовых сумм осадков и их тренды за период 1961–2020 гг. на территориях с разными физико-географическими особенностями: таежная, лесостепная, степная и горная. В таежной зоне, примером которой является станция Томск (рис. 6, б), видно, что наблюдается положительный статистически значимый тренд, количество осадков за 60 прошедших лет имеет тенденцию к увеличению. В лесостепной зоне Новосибирской и Кемеровской областей и в горной зоне Республики Алтай (см. рис. 6, а, е) в годовом распределении осадков также отмечается положительный тренд, хотя статистически малозначимый. В отдельных степных районах территорий Новосибирской, Кемеровской областей и Алтайского края увеличение годового количества осадков совсем незначительно или не претерпело изменения (статистически малозначимые линейные тренды), это видно на примере станций Красное, Барнаул (см. рис. 6, г, д), а по станции Карасук (см. рис. 6, в, юго-запад Новосибирской области) тренд отрицательный, хотя статистически малозначимый.

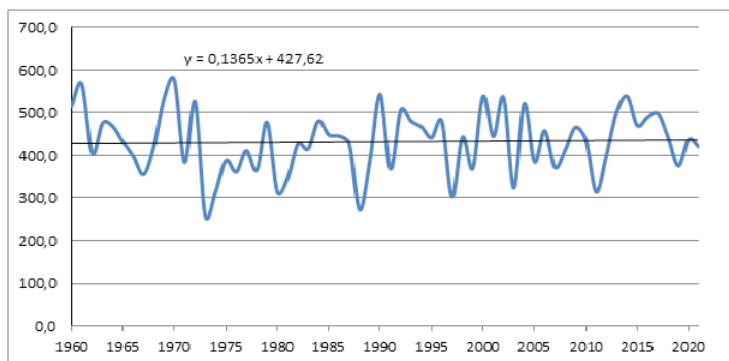
Интересным представилось рассмотреть на примере этих же станций осадки теплого (апрель–октябрь) и холодного (ноябрь–март) периодов года. Какой из этих периодов вносит более ощутимый вклад в изменение количества годовых осадков за период с 1961 по 2020 г.? На примере станций таежной и лесостепной зоны (Томск, Маслянино) на рис. 7 (1а, 2а и 1б, 2б) видно, что наиболее статистически значимый положительный тренд осадков отмечается в холодный период года, что говорит об увеличении тенденции выпадения твердых осадков. На примере станций степной зоны юго-востока Западной Сибири (Красное, Барнаул, Карасук) видно, что количество осадков в теплом и холодном периодах мало чем отличается от годового распределения.



а - Маслянино, Новосибирская область

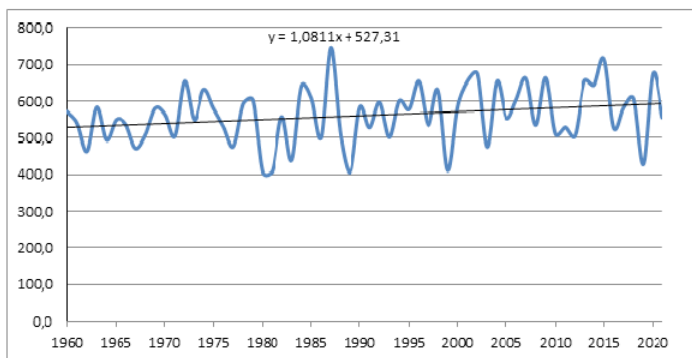


в - Карасук, Новосибирская область

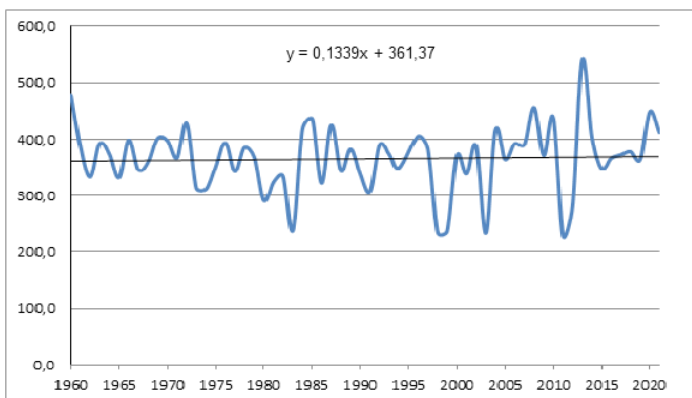


д - Барнаул, Алтайский край

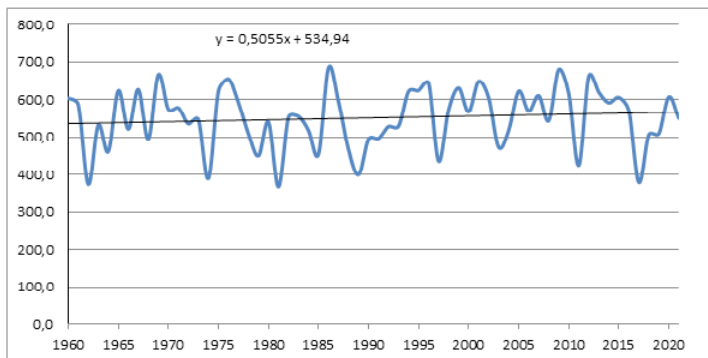
Рис. 6 (начало). Годовое количество осадков за период 1960–2020 гг. по станциям Маслянино (а), Томск (б), Карасук (в), Красное (г), Барнаул (д), Ак-Кем (е)



б - Томск

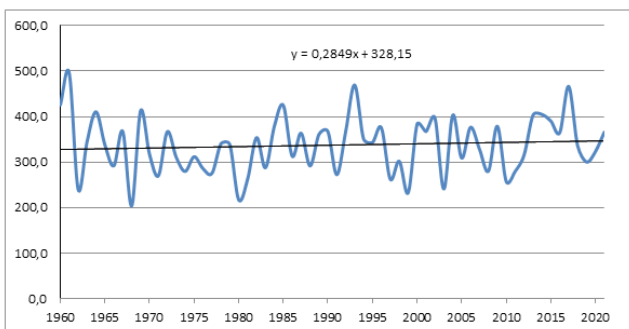


г - Красное, Кемеровская область

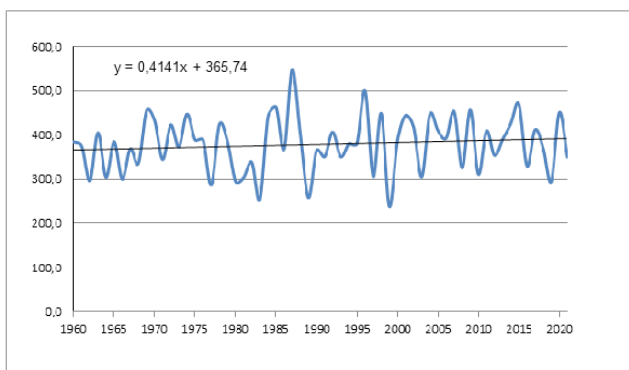


е - Ак-Кем, Республика Алтай

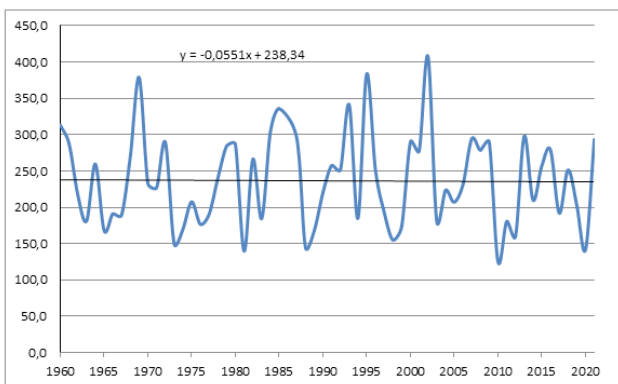
Рис. 6 (окончание)



1а - Маслянино, теплый период

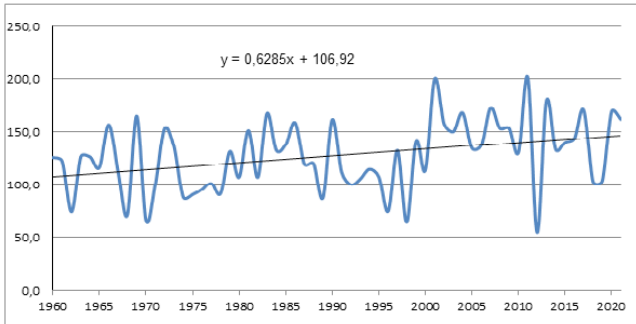


1б - Томск, теплый период

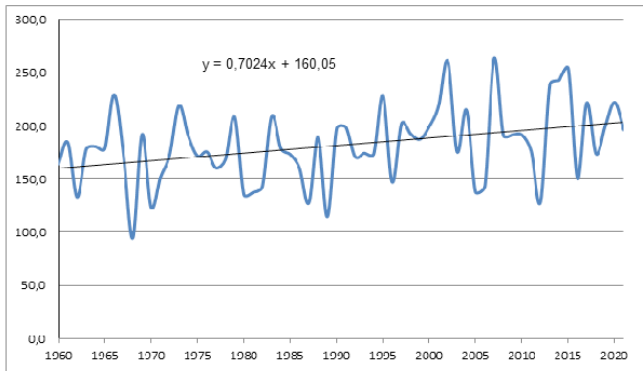


1в - Карасук, теплый период

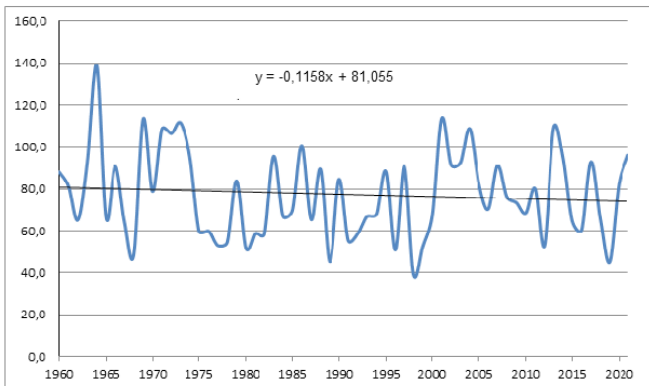
Рис. 7 (начало). Количество осадков по станциям в теплый период года (1а, 1б, 1в, 1г, 1д, 1е), в холодный период года (2а, 2б, 2в, 2г, 2д, 2е)



2а - Маслянино, холодный период



2б - Томск, теплый период



2в - Карасук, холодный период

Рис. 7 (продолжение)

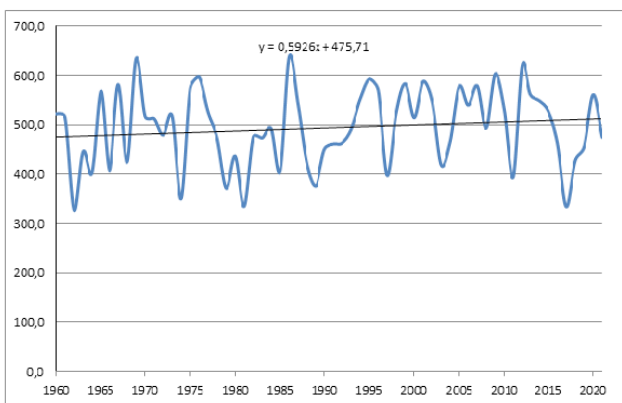
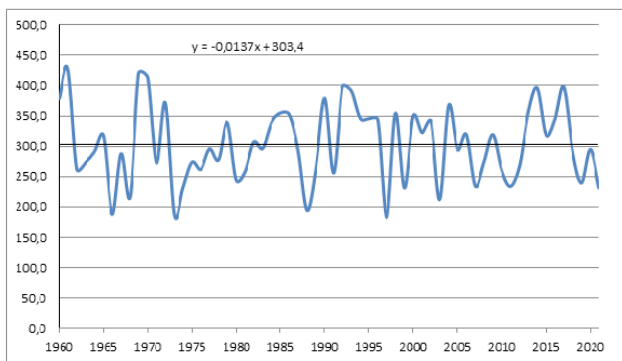
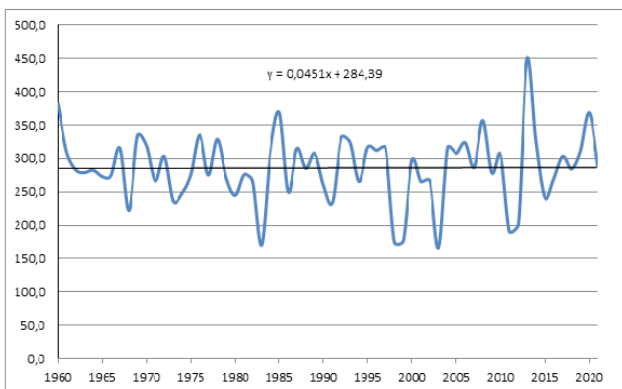
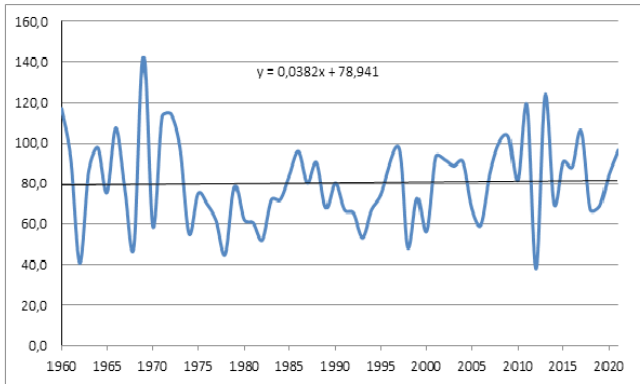
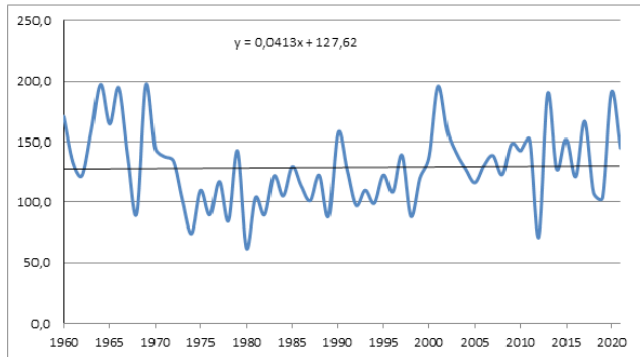


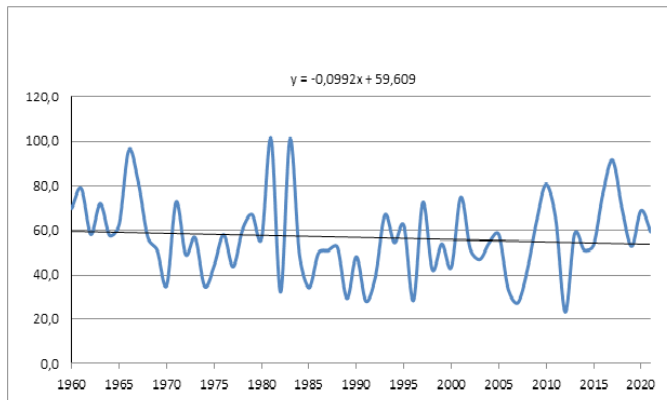
Рис. 7 (продолжение)



2 г - Красное, холодный период



2д - Барнаул, холодный период



2е - Ак-Кем, холодный период

Рис. 7 (окончание)

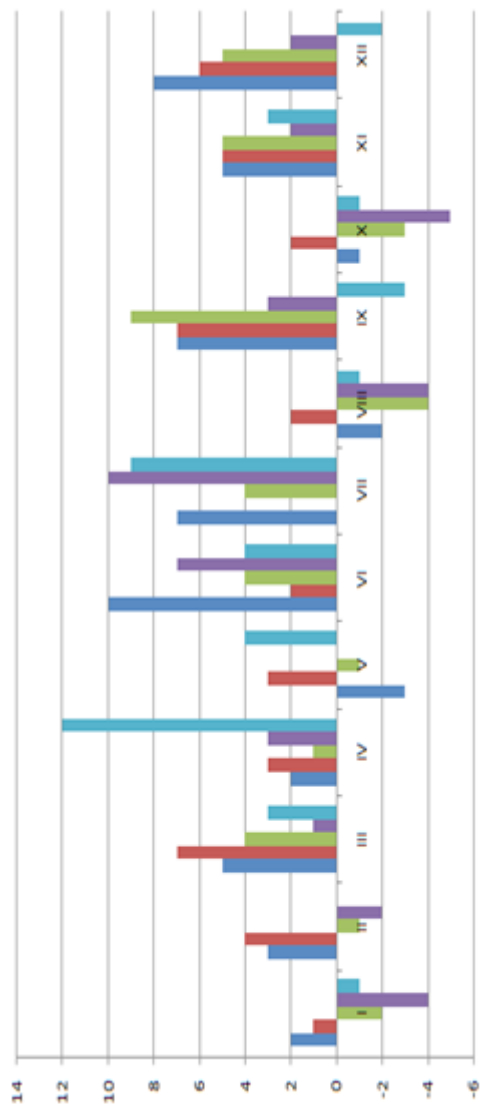


Рис. 8. Диаграмма распределения в течение года разницы в осадках норм 1961–1990 и 1991–2020 гг.

На горной метеостанции Ак-Кем заметен статистически значимый положительный тренд выпадения осадков в теплый период года (1e); в холодный период года (2e) отмечается отрицательный тренд, хотя он статистически малозначимый, т. е. наблюдается тенденция к уменьшению снегонакопления в горной зоне выше 2 км.

По всем метеостанциям проанализировано сравнение норм осадков за периоды 1961–1990 и 1991–2020 гг. На диаграмме (рис. 8) показано распределение разницы в нормах осадков по месяцам. В течение всего года во все месяцы прирост осадков в нормах 1991–2020 гг. отмечается по Томской области, хотя в летние месяцы (май–август) по отдельным станциям на северо-востоке и в центре области, напротив, наблюдается уменьшение среднегодовых осадков. На остальной территории в отдельные месяцы (май, август, октябрь в Новосибирской области; январь, февраль, май, август, октябрь в Кемеровской области; январь, февраль, август, октябрь в Алтайском крае; январь, август, октябрь, декабрь в Республике Алтай) количество осадков в новых нормах уменьшается.

Количество осадков в норме 1991–2020 гг. (рис. 9) в среднем за год по территории Новосибирской области увеличилось на 43 мм, в Томской области – на 41 мм, в Кемеровской – на 22 мм, в Алтайском крае – на 14 мм и в Республике Алтай – на 11 мм. В отдельных районах юго-запада Новосибирской области (Карасук, Краснозерка), запада Алтайского края (Славгород, Рубцовск) и северо-востока Алтайского края (Бийск-Зональная), центра и востока Кемеровской области (Белово, Междуреченск), северо-востока Республики Алтай (Турочак, Яйлю) и ее юго-востока (Кош-Агач) в новых нормах количество осадков уменьшилось от 0,5 мм (ст. Кош-Агач) до 34 мм (ст. Турочак), причем снижение норм приходится в основном на холодный период, что также может говорить о тенденции к уменьшению снегозапасов в этих районах.

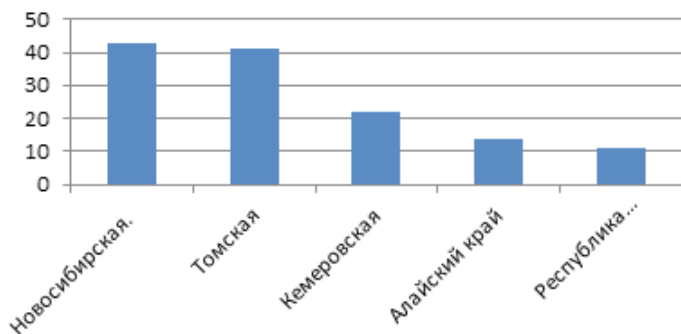


Рис. 9. Диаграмма распределения по территориям юго-востока Западной Сибири разницы в осадках норм 1961–1990 и 1991–2020 гг.

Формы атмосферной циркуляции

Наблюдаемые изменения в климате, начавшиеся в последние десятилетия XX в. и продолжающиеся в XXI в., связаны не только с антропогенным влиянием на окружающую среду. Свой вклад в наблюдающееся потепление вносит и общая циркуляция атмосферы. Еще в прошлом веке для описания процессов в атмосфере известными учеными-метеорологами была проведена типизация атмосферных макропроцессов. Наиболее часто для описания синоптических процессов используют формы циркуляции Вангенгейма–Гирса: западная (W), восточная (E) и меридиональная (C), которые описывают не только приземное поле давления, но и вертикальную структуру приземного слоя атмосферы [5]. Для анализа и выявления возможной связи повторяемости форм циркуляции с изменением температурного режима и режима осадков на территории юго-востока Западной Сибири в периоды 1961–1990 и 1991–2020 гг. был использован каталог аномалий форм циркуляции с 1961 по 2020 г., подготовленный в ААНИИ Росгидромета.

По аномалиям форм циркуляции рассчитаны средние величины аномалий каждой из форм циркуляции за периоды 1961–1990 и 1991–2020 гг. и построены графики изменения форм циркуляции (W, C, E) в течение года.

На рис. 10–12 представлены графики повторяемости по месяцам форм циркуляции. При параллельном анализе диаграмм распределения норм температуры воздуха и количества осадков и графиков изменения форм циркуляции в течение года можно предположить, что на изменение распределения погодных параметров, помимо прочих факторов, влияет и циркуляция атмосферы. Сравнение средних данных за 1961–1990 и 1991–2020 гг. подтверждает наличие изменений в атмосферных процессах, исследованию которых посвящен ряд работ еще прошлого века, описывающих эпохи атмосферной циркуляции и их преобразования [5].

Повышение температуры и увеличение количества осадков в холодный период года в северной части территории юго-востока Западной Сибири в некоторой степени можно объяснить увеличением повторяемости процессов западной формы циркуляции (W) в этот период года (см. рис. 10). Для западной формы циркуляции характерно широтное распределение потоков воздуха с запада на восток при наличии небольших быстро перемещающихся барических волн в атмосфере. В последнее тридцатилетие почти в два раза возросла повторяемость западных (зональных) форм циркуляции, причем наибольшее увеличение повторяемости отмечается в холодный период года и в весенние месяцы. Под высотной фронтальной зоной атлантические циклоны чаще проникают вглубь Евразии, принося тепло и осадки на территорию Западной Сибири преимущественно в районы севернее 50° с.ш.

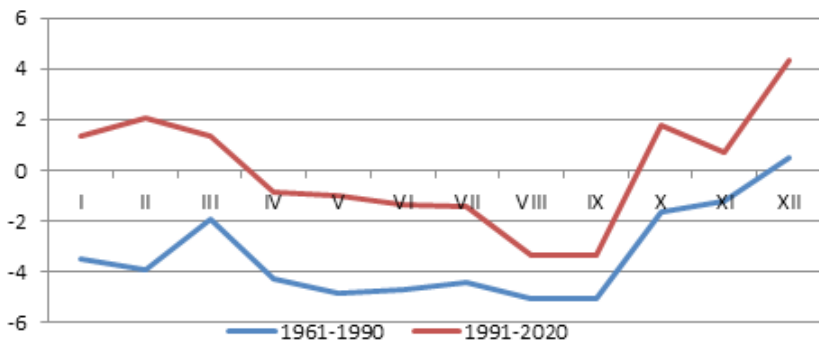


Рис. 10. Графики хода аномалий формы циркуляции W

На рис. 11 видно, что при этом уменьшается повторяемость восточной формы циркуляции E. При ее классической форме расположения барического гребня от 20 до 60° в.д. происходит вторжение холодных арктических масс в Западную Сибирь. На рисунке видно значительное уменьшение повторяемости этой формы циркуляции в холодный период года, что также в некоторой степени объясняет более значимое повышение температуры воздуха в средних многолетних значениях 1991–2020 гг. в холодный период года и в ранние весенние месяцы.

На рис. 12 представлен график распределения формы циркуляции C в периоды 1961–1990 и 1991–2020 гг. По графику можно проследить, что зимой и весной увеличилась повторяемость этой формы циркуляции. При меридиональной форме циркуляции C происходит вынос теплого и сухого воздуха на юго-восток Западной Сибири, что также может обуславливать повышение температуры в этот период года.

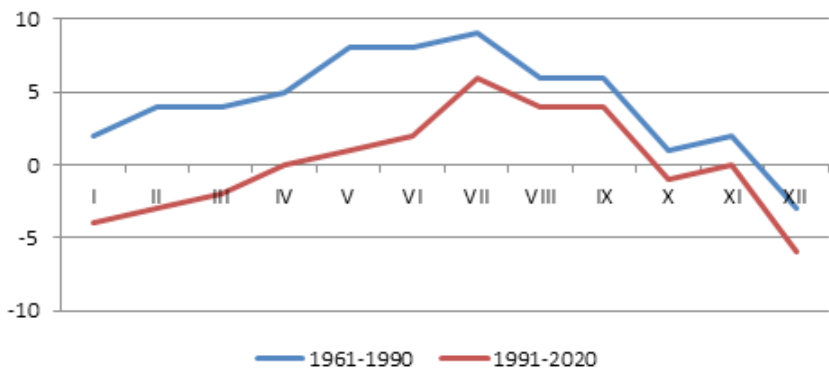


Рис. 11. Графики хода аномалий формы циркуляции E

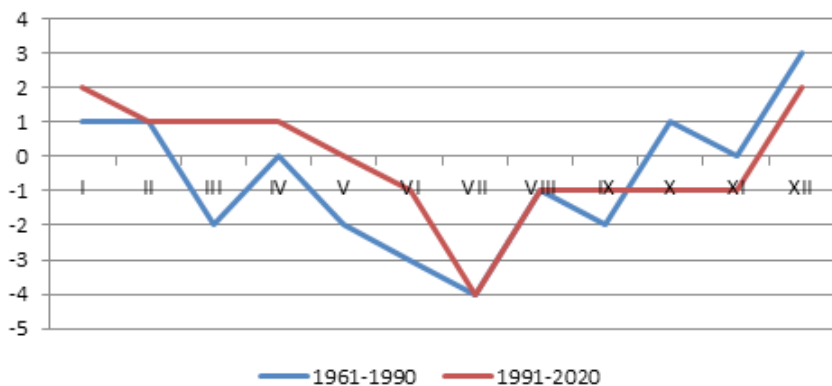


Рис. 12. Графики хода аномалий формы циркуляции С

Анализируя ход аномалий форм циркуляции за периоды 1961–1990 и 1991–2020 гг., можно предположить, что произошла смена эпох в формах циркуляции W, С, Е и что атмосферная циркуляция, так же как и антропогенное воздействие, могла внести свой вклад в изменение климата на территории юго-востока Западной Сибири.

Заключение

Объединив вышесказанное, можно отметить:

- основными факторами, определяющими климат территории юго-востока Западной Сибири, являются ее географические особенности, которые влияют на распределение температуры воздуха и количества осадков;
- среднегодовая температура воздуха в период 1991–2020 гг. повысилась на всей территории юго-востока Западной Сибири в среднем на 1,0 °С, причем повышение более чем на 1,0 °С отмечается в холодный период года, а в теплый период – менее чем на 1,0 °С;
- более интенсивно «теплеют» зимние месяцы: январь, февраль и декабрь, а также апрель и октябрь;
- прирост осадков отмечается на большей части исследуемой территории, в северной части юго-востока Западной Сибири отмечается положительный статистически значимый тренд увеличения осадков за 60 лет;
- прирост осадков в нормах 1991–2020 гг. отмечается во все месяцы года по Томской области, на остальной территории увеличение осадков отмечается преимущественно весной (март–апрель), летом (июнь, июль) и в предзимье (ноябрь–декабрь);
- количество осадков в новых нормах в среднем за год увеличилось по Новосибирской области на 43 мм, по Томской области – на 41 мм, по

Кемеровской – на 22 мм, по Алтайскому краю – на 14 мм и в Республике Алтай – на 11 мм;

– в отдельных районах юго-запада Новосибирской области, Алтайского края, Кемеровской области, Республики Алтай в новых нормах количество осадков уменьшилось от 0,5 мм (ст. Кош-Агач) до 34 мм (ст. Турочак).

Выводы, полученные в результате исследования температурного режима и режима осадков за период 1961–2020 гг. по станциям юго-востока Западной Сибири, подтверждают выводы Климатического центра Росгидромета по Сибирскому федеральному округу о повышении температуры воздуха преимущественно в зимние и весенние месяцы и об увеличении количества осадков в большинстве районов округа [2].

Литература

1. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. М., 2022. 104 с.
2. Глобальное изменение климата и Сибирский Федеральный округ. На пути адаптации. ФГБУ «ГГО», 2021. 12 с.
3. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. СПб., 2017. 113 с.
4. Предложения по адаптации и смягчению последствий воздействия волн жары для жизни и здоровья населения Сибирского региона, проработанные с заинтересованными органами власти и РАН. Оценка целесообразности адаптационных мер к изменению и изменчивости климата в условиях создаваемых рисков ущерба: Отчет о НИР (закл.) / ФГБУ «СибНИГМИ»; шифр темы 1.3.4.2; рук. И.О. Лучицкая. Новосибирск, 2016. 44 с. Рег. № НИОКТР АААА-А16-116040810026-5. Рег. № ИКРБС АААА-Б17-217020750226-8.
5. Гирс А.А., Кондратович К.В. Методы долгосрочных прогнозов погоды. Л.: Гидрометеиздат, 1978, 337 с.

ОЦЕНКА СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕНДЕНЦИЙ В НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ МЕТОДОМ КВАНТИЛЬНОЙ РЕГРЕССИИ

О.В. Климов, В.М. Топоров

*ФГБУ «Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт», Новосибирск*

Приводятся результаты оценки трендовой составляющей изменения температуры воздуха и осадков для территории Новосибирской области, рассчитанной с помощью квантильной регрессии. Оценка рассчитана для 19 пунктов, расположенных в различных физико-географических зонах. Расчеты детализированы по сезонам года (весь период, лето, зима). Метод квантильной регрессии позволяет определить изменение метеорологических параметров для любых квантилей интегральной кривой распределения вероятностей.

В результате были получены различные статистические характеристики рядов среднегодовой температуры не только за весь период наблюдений (85 лет), но и за два последовательных отрезка ряда (42 и 43 года). Кроме того, такие же характеристики были рассчитаны для средних сезонных значений температур (лето, зима). Анализ полученных результатов позволяет сделать ряд выводов, главный из которых заключается в определении тренда среднегодовых температур не только для всех рассматриваемых временных периодов, но и для оценки изменения квантилей температур.

Ключевые слова: летние, зимние температуры воздуха, квантильный анализ, интерквантильное расстояние, высшие экстремумы, низшие экстремумы.

ASSESSMENT OF CURRENT CLIMATE TRENDS IN THE NOVOSIBIRSK REGION USING THE QUANTILE REGRESSION METHOD

O.V. Klimov, V.M. Toporov

Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute, Novosibirsk

The results of the assessment of the trend component of the change in air temperature and precipitation for the territory of the Novosibirsk region, calculated using quantile regression, are presented. The estimate is calculated for nineteen

points located in different physical and geographical zones. The calculations are detailed by seasons of the year (entire period, summer, winter). The quantile regression method allows to determine the change in meteorological parameters for any quantiles of the integral probability distribution curve.

As a result, various statistical characteristics of the mean annual temperature series were obtained not only for the entire observation period (85 years), but also for two consecutive segments of the series (42 and 43 years). In addition, the same characteristics were calculated for average seasonal temperatures (summer, winter). An analysis of the results obtained allows us to draw a number of conclusions, the main of which is to determine the trend of average annual temperatures not only for all considered time periods, but also to assess the change in temperature quantiles.

Key words: *summer, winter air temperatures, quantile analysis, interquantile distance, higher extremes, lower extremes.*

Введение

Теме изменения климата посвящено значительное количество статей, монографий и просто заметок в различных источниках [1–5]. В них, с различной степенью детальности и масштабности процессов, рассматриваются тенденции изменения метеорологических элементов за различные интервалы времени. Как правило, эти интервалы ограничены наличием материалов наблюдений и используемым математическим аппаратом. Среди огромного числа литературы нельзя не отметить труды Г.В. Груза, Э.Я. Раньковой, особенно капитальную монографию об изменении климата России [6]. Среди метеорологических величин чаще всего исследуют температуру приземного воздуха и осадки. Что касается анализируемых периодов, то здесь нет единого подхода. Данные за отдельные рассматриваемые периоды сравниваются с многолетними данными за весь период наблюдений или с любым периодом за последние годы. Наиболее часто используется тридцатилетний период, как правило, за 1960–1990 гг., который был рекомендован ВМО в качестве среднего значения за последние годы, хотя как раз этот случай наименее обоснован с точки зрения как физики, так и математики [6, 7].

Основными инструментами, используемыми при анализе гидрометеорологических рядов, являются статистические методы, базирующиеся на регрессионных зависимостях и разложениях рядов по различным составляющим, имеющим закономерные изменения. Наиболее часто используются расчеты трендовой составляющей либо разложение рядов по естественным ортогональным составляющим или рядам Фурье [8–10].

Классический способ расчета тренда основан на определении параметров с помощью «метода наименьших квадратов» и отображает тенденцию изменений лишь средних значений переменных, оставляя без внима-

ния весь их диапазон. Кроме того, метод является параметрическим и требует соблюдения ряда условий при его применении.

При регрессионном анализе, выполняемом методом квантильной регрессии, наглядной характеристикой полученного результата является так называемая процесс-диаграмма. Напомним, что *квантиль* – это значение, которое заданная случайная величина не превышает с фиксированной вероятностью. Анализ климатического тренда проводят с помощью процесс-диаграмм, представляющих собой зависимость значения климатического тренда от значения квантиля (квантиль изменяется в диапазоне от 0 до 1). Если вероятность задана в процентах, то квантиль называется *процентилем*, или *перцентилем*.

Достоинством метода квантильной регрессии является полнота информации о поведении исследуемой величины. В результате его применения в климатологии возможно получить вектор квантильных трендов в диапазоне квантилей от 0 до 1 практически с любой степенью детализации в зависимости от полноты входных данных, тогда как классический метод наименьших квадратов предоставляет всего одно значение тренда. Не менее важное преимущество заключается в том, что метод не является параметрическим, и следовательно, не предполагает, что распределение исследуемой величины принадлежит параметрическому семейству.

Целью исследований является анализ статистических характеристик рядов температуры воздуха, полученных для разных сезонов и различных многолетних периодов. Одной из главных задач является определение изменений не только для средней температуры воздуха за период, но и для различных квантилей температуры за этот же период, прежде всего квантилей 0,05 и 0,95.

Основные положения метода квантильной регрессии хорошо изложены в работах [11, 12].

Методика расчета и результаты

Большинство авторов публикаций, где для анализа применяется аппарат квантильной регрессии, используют суточные базы данных [13–15]. В этом случае определяют значения квантилей для каждого года, затем для каждого квантиля вычисляется временной тренд. Таким образом, определяются тренды для всего диапазона рассматриваемых величин. В нашей работе рассматриваются среднемесячные значения температуры воздуха, поэтому методика расчетов несколько отличается от описанной выше.

Для расчетов использовались среднемесячные данные о температуре воздуха на 19 метеорологических станциях, расположенных на территории Новосибирской области. Все данные имеют длительные ряды наблюдений

(1936–2020 гг.), минимум пропусков, а метеостанции распределены равномерно по различным природным зонам. Новосибирская область расположена в четырех природных зонах: тайге (северная часть и восточная часть), зоне смешанных лесов, лесостепи и степи [16].

Расчеты статистических характеристик температур проведены для трех внутригодовых периодов: календарного года, зимнего и летнего сезонов. Каждый из периодов был разделён на два временных отрезка. Таким образом, для каждого периода были рассчитаны три варианта параметров. Первый вариант – для полного ряда наблюдений, второй и третий – для частей ряда, полученных при его делении. Границы указанных временных отрезков были определены с учетом данных разностных интегральных кривых, которые были построены для всех рядов температуры воздуха, взятых для расчета. Немаловажную роль играет и количество лет во временных отрезках. Для правильного сопоставления данных расчета длительность отрезков должна быть примерно одинаковой.

На рис. 1 в качестве примера приведены разностные интегральные кривые среднегодовой температуры воздуха для пункта Барабинск. На нем четко прослеживается временной отрезок, когда усредненное значение температур за это время было меньше среднего за весь период наблюдений (кривая направлена вниз), и отрезок с превышениями температур (кривая направлена вверх). Перелом приходится на 1975–1978 гг. Подобные кривые получены и для остальных пунктов наблюдений. Учитывая синхронность хода температур для всей Новосибирской области, было решено выбрать единые временные отрезки расчета характеристик для всех пунктов наблюдений. Первый отрезок – 1936–1977 гг., второй отрезок – 1977–2020 гг. Для краткости изложения в дальнейшем будем их называть первым и вторым отрезками.

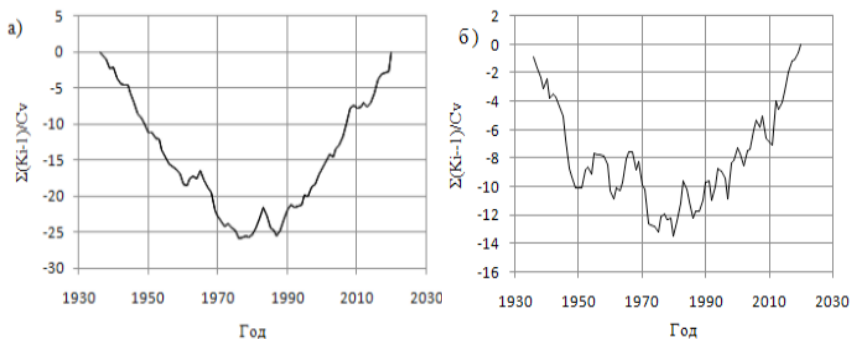


Рис. 1. Разностные интегральные кривые среднегодовых температур воздуха для календарного года (I–XII) (а) и летнего сезона (VI–VIII) (б), г. Барабинск

Длительность полного периода наблюдений составляет 85 лет, двух отрезков, – соответственно, 42 и 43 года. Таким образом, для каждого из этих временных отрезков рассчитывались 3 варианта: один для среднегодовых значений за календарный год, два других для зимних и летних сезонов.

Летний сезон представлен средними температурами за 3 месяца (VI–VIII). Зимний сезон, продолжительностью 5 месяцев, включает ноябрь и декабрь предыдущего года и январь, февраль, март следующего (XI–III). Весенние и осенние сезоны не рассматривались.

В результате расчетов были получены характеристики, которые приведены в табл. 1 и 2. В таблицах помещены результаты расчетов только для летнего и зимнего сезонов без среднегодовых значений за календарный год. Два рассмотренных сезона полностью определяют и изменчивость температур за год.

Таблицы содержат следующие характеристики:

T_{cp} – среднемесячная температура воздуха за рассматриваемый период;

a , °C/10 лет – коэффициент тренда в градусах за 10 лет;

D – вклад тренда в дисперсию исходных временных рядов (в долях от 1);

$T_{0,05}, \dots, T_{0,95}$ – температуры, соответствующие квантилям 0,05; 0,25; 0,50; 0,75; 0,95;

R – размах колебаний, разность между максимальной и минимальной наблюдавшимися среднемесячными температурами;

X – интерквантильное расстояние, равное разности между $T_{0,75}$ и $T_{0,25}$ и характеризующее интервал, содержащий 50 % выборки.

Все статистические параметры рассчитываются стандартными методами математической статистики.

Температура за год. В основной период (1936–2020 гг.) среднегодовая многолетняя температура по области составляет 0,8 °C, изменяясь по территории от 0,0 °C для северо-западных районов (Кыштовка, Северное, Убинское) до 1,7 °C для южных районов (Карасук). При этом максимальная среднемесячная температура на всех пунктах наблюдалась в один и тот же 2020 г. и составила 4 °C для области. Самой высокой она была в Карасуке (4,9 °C), а самой низкой за этот год – в Маслянино (3,2 °C).

Минимальные годовые температуры во всех пунктах тоже наблюдались в одном 1969 г. Наибольшая температура здесь равна –1,4 °C (Карасук), наименьшая –3,2 °C (Северное). Коэффициент тренда для среднегодовой температуры был положительным для всех пунктов. За весь период наблюдений средний для области коэффициент равен 0,30 °C для десятилетнего периода. Наибольший коэффициент равен 0,34 °C/10 лет (Кочки), наименьший был 0,25 °C/10 лет (Болотное, Кыштовка).

Таблица 1

Статистические характеристики межгодовой изменчивости зимних температур

Пункт	Зима 1936–1976										Зима 1977–2020									
	T_{cp}	$a^{\circ}C/10$	D	$T_{0,05}$	$T_{0,25}$	$T_{0,5}$	$T_{0,75}$	$T_{0,95}$	R	X	T_{cp}	$a^{\circ}C/10$	D	$T_{0,05}$	$T_{0,25}$	$T_{0,5}$	$T_{0,75}$	$T_{0,95}$	R	X
Барабинск	-14,9	0,27	0,02	-18,3	-16,7	-14,9	-13,1	-11,0	11,5	3,54	-12,3	0,34	0,03	-15,9	-13,7	-12,1	-10,3	-8,8	12	3,40
Боготное	-14,2	0,15	0,01	-17,1	-15,7	-13,8	-12,8	-11,1	11,0	2,9	-12,0	0,27	0,03	-14,6	-13,0	-12,3	-10,5	-8,6	9,8	2,5
Здвинск	-15,3	0,30	0,02	-18,9	-17,1	-14,9	-14,0	-12,0	7,9	2,9	-12,9	0,35	0,04	-15,5	-14,1	-13,0	-11,4	-9,4	11,0	2,7
Карасук	-14,7	0,27	0,02	-18,5	-16,5	-14,5	-13,3	-11,3	7,9	3,1	-12,3	0,31	0,03	-13,3	-12,9	-12,0	-10,6	-8,8	6,5	2,3
Кольвань	-14,8	0,23	0,01	-17,8	-16,3	-14,2	-13,2	-11,5	6,9	2,6	-12,2	0,34	0,04	-13,2	-12,5	-11,8	-10,8	-8,8	5,7	3,1
Кочки	-15,3	0,17	0,01	-18,7	-17,0	-15,0	-13,8	-11,7	7,7	3,4	-12,6	0,16	0,01	-15,4	-14,0	-13,0	-10,9	-9,0	8,1	3,1
Красноозерск	-14,8	0,15	0,05	-18,5	-16,9	-14,1	-13,4	-11,7	7,7	3,5	-12,3	0,19	0,01	-15,5	-13,4	-12,7	-10,8	-8,6	8,2	2,7
Кутино	-15,0	0,20	0,01	-18,3	-16,9	-14,6	-13,5	-11,9	-10,6	3,4	-12,6	0,14	0,01	-15,9	-13,8	-13,0	-11,2	-8,7	8,8	2,6
Кыштовка	-15,3	0,04	0,00	-18,3	-16,8	-14,9	-13,8	-12,0	7,4	3,0	-13,2	0,16	0,01	-16,3	-14,7	-13,5	-11,7	-10,8	7,7	3,0
Масляно	-15,4	0,17	0,01	-18,5	-17,6	-15,0	-13,5	-12,2	6,8	4,1	-12,8	0,14	0,06	-15,5	-14,3	-13,2	-11,7	-10,1	7,8	2,6
Мошково	-14,4	0,36	0,05	-18,1	-15,6	-14,3	-13,2	-11,3	7,9	2,4	-11,8	0,12	0,01	-16,7	-12,8	-11,8	-10,6	-8,5	7,7	2,2
Огурдово	-14,4	0,13	0,01	-17,2	-15,8	-13,9	-12,7	-10,7	15,6	3,1	-11,9	0,16	0,01	-14,7	-13,3	-12,3	-10,5	-8,3	10,2	2,7
Ордынское	-14,4	-0,12	0,00	-18,1	-16,7	-14,0	-12,8	-10,9	15,8	3,9	-12,1	0,10	0,00	-15,0	-13,2	-12,5	-10,6	-8,6	10,8	2,6
Посевная	-14,2	0,17	0,08	-17,3	-15,8	-13,6	-12,7	-11,0	11,0	3,1	-11,7	0,14	0,01	-14,1	-12,8	-12,0	-10,4	-8,4	9,9	2,4
Северное	-15,2	0,00	0,00	-18,1	-18,1	-18,1	-18,1	-18,1	12,7	0,0	-13,0	0,27	0,02	-16,0	-14,4	-13,5	-11,4	-9,3	9,5	3,0
Татарск	-14,8	0,25	0,08	-18,1	-16,3	-14,8	-13,3	-11,4	12,0	3,0	-12,4	0,13	0,01	-15,7	-13,7	-12,7	-10,9	-8,5	9,5	2,8
Убинское	-15,7	0,26	0,02	-19,4	-17,2	-15,4	-14,3	-12,6	12,2	2,9	-13,1	0,15	0,01	-16,0	-14,4	-13,6	-11,7	-9,3	10,3	2,6
Чистоозерное	-15,1	0,18	0,01	-18,1	-16,4	-14,9	-13,6	-11,8	7,4	2,8	-12,7	0,15	0,01	-15,7	-14,0	-13,1	-11,3	-8,9	7,3	2,7
Чулым	-15,1	0,12	0,00	-18,3	-16,8	-14,6	-13,7	-12,1	12,2	3,1	-12,5	0,19	0,01	-15,4	-13,8	-12,8	-11,1	-8,8	10,2	2,7
Среднее	-14,9	0,17	0,02	-18,2	-16,6	-14,7	-13,6	-11,9	9,0	3,0	-12,4	0,2	0,0	-15,3	-13,6	-12,7	-11,0	-9,0	9,0	2,7

Таблица 2

Статистические характеристики межгодовой изменчивости летних температур

Пункт	Лето 1936–1976										Лето 1977–2020									
	T_{cp}	$a^{\circ}C/10$	D	$T_{0,05}$	$T_{0,25}$	$T_{0,5}$	$T_{0,75}$	$T_{0,95}$	R	X	T_{cp}	$a^{\circ}C/10$	D	$T_{0,05}$	$T_{0,25}$	$T_{0,5}$	$T_{0,75}$	$T_{0,95}$	R	X
Барабинск	17,0	0,11	0,03	15,5	16,5	17,1	17,4	18,4	3,8	0,9	17,5	0,11	0,02	16,1	16,9	17,5	18,2	18,7	4,4	1,25
Боготное	16,9	0,03	0,00	15,6	16,4	16,7	17,5	18,4	4,1	1,1	17,1	0,1	0,03	16,0	16,6	17,2	17,7	17,7	4,0	1,1
Здвинск	17,5	0,06	0,01	15,9	17,0	17,5	18,1	19,1	4,0	1,1	17,9	0,14	0,04	16,6	17,3	17,9	18,5	18,9	4,4	1,2
Карасук	18,7	0,07	0,01	16,8	18,1	18,6	19,3	20,4	3,6	1,2	19,2	0,15	0,04	19,0	19,3	19,6	20,0	20,4	2,8	0,7
Кольвань	16,9	0,16	0,05	15,5	16,3	16,8	17,6	18,2	3,8	1,3	17,5	0,23	0,12	17,2	17,7	17,9	18,1	19,0	2,7	1,1
Кочки	17,0	0,15	0,04	15,6	16,3	17,0	17,8	18,3	4,2	1,5	17,8	0,09	0,02	16,6	17,2	17,9	18,5	19,0	3,8	1,1
Красноозерск	17,8	0,08	0,01	16,0	17,1	17,7	18,4	19,3	3,9	1,3	18,3	0,18	0,06	16,8	17,6	18,4	18,9	19,4	4,4	1,3
Кулино	18,0	0,00	0,00	16,4	17,4	18,1	18,6	19,6	4,2	1,2	18,4	0,06	0,01	16,8	17,8	18,5	19,0	19,7	4,1	1,2
Кыштовка	16,3	0,03	0,00	14,7	15,8	16,3	16,8	17,3	3,6	1,0	16,6	0,12	0,03	15,2	16,0	16,5	17,0	17,7	3,9	1,0
Маслянино	16,2	0,06	0,01	15,3	15,6	16,1	16,8	17,5	3,3	1,2	16,8	0,19	0,10	15,8	16,1	16,7	17,1	17,6	3,2	0,9
Мошково	16,6	0,04	0,04	15,0	15,9	16,5	17,1	17,8	3,7	1,2	17,0	0,15	0,06	15,5	16,4	17,0	17,6	18,3	3,2	1,1
Огурцово	17,3	0,02	0,00	16,2	16,7	17,3	18,0	19,2	5,0	1,3	17,9	0,21	0,09	16,6	17,2	18,0	18,3	19,1	4,2	1,1
Ордынское	17,5	0,10	0,02	16,4	16,8	17,5	18,2	18,8	3,9	1,4	18,2	0,12	0,03	17,0	17,6	18,2	18,7	19,3	4,6	1,1
Посевная	16,7	0,13	0,03	15,1	15,9	16,4	17,4	18,2	4,1	1,4	17,1	0,16	0,06	16,1	16,5	17,2	17,6	18,3	4,5	1,1
Северное	16,0	0,06	0,01	14,6	15,5	16,0	16,5	17,1	3,0	1,0	16,6	0,11	0,02	15,3	15,9	16,6	17,3	17,9	4,6	1,4
Татарск	17,2	0,25	0,10	15,6	16,6	17,4	17,8	18,8	3,7	1,2	17,8	0,07	0,01	16,3	17,3	17,9	18,4	19,2	4,8	1,1
Убинское	16,4	0,02	0,10	15,1	15,8	16,4	17,0	17,7	3,3	1,2	16,9	0,01	0,00	15,6	16,3	16,8	17,4	18,0	4,0	1,2
Чистоозерное	17,9	0,12	0,03	16,2	17,3	18,0	18,5	19,3	3,9	1,2	18,5	0,08	0,01	16,8	17,8	18,6	19,2	19,8	4,5	1,4
Чултым	16,9	0,01	0,00	15,7	16,5	16,9	17,5	18,2	3,3	1,0	17,2	0,10	0,02	15,8	16,7	17,4	17,7	18,4	4,6	1,1
Среднее	17,1	0,08	0,03	15,6	16,5	17,1	17,7	18,5	3,8	1,2	17,6	0,13	0,04	0,04	16,4	17,7	18,2	18,8	4,0	1,1

Зимний сезон. Как уже отмечалось, зимний сезон включает 5 месяцев: ноябрь и декабрь предыдущего года и январь–март следующего. Полученное среднее значение температуры за этот период формально отнесено к году с 3 месяцами. Средняя температура зимних месяцев по области для основного периода (1936–2020) составляет $-13,6$ °С, изменяясь по станциям от $-12,9$ до $-14,4$ °С. Средняя зимняя температура по области в первый временной отрезок (1936–1977) была $-14,9$ °С, во втором отрезке (1978–2020) стала $-12,4$ °С, т. е. увеличилась на $2,5$ °С.

Коэффициенты трендов для всех пунктов наблюдений за полный период положительные. Среднее значение коэффициентов равно $0,48$ °С за 10 лет. Наибольший коэффициент был в Мошково и Здвинске и составил $0,53$ °С/10 лет, а наименьший – в Кыштовке ($0,41$ °С/10 лет).

Самая теплая зима за весь период наблюдений была в 2020 г. во всех пунктах наблюдений. Максимум средних зимних температур достигал $-6,7$ °С в Ордынском, а минимум $-8,5$ °С в Кыштовке. Самая холодная зима тоже наблюдалась в одном 1969 г. Минимальная температура была в Северном (-23 °С). Рост средних зимних температур по области увеличился во втором отрезке времени. Если в первом среднее значение коэффициента тренда равно $0,17$ °С/10 лет, то во втором оно увеличивается до $0,20$ °С/10 лет.

Интерквартильное расстояние уменьшилось с $3,0$ до $2,7$ °С. Левая граница сдвинулась с $-11,9$ до -9 °С, а правая с $-18,2$ до $-5,3$ °С. Сдвиг произошел в сторону потепления.

Летний сезон. Три летних месяца относятся к летнему сезону (июнь, июль, август). Одной из основных характеристик является средняя температура воздуха. Для Новосибирской области средняя температура за лето равна $17,4$ °С за весь период наблюдений. Ее максимум $18,9$ °С был в Карасуке, а минимум $16,3$ °С – в Северном, что указывает на широтную зональность распределения поля температур в области. Самые высокие значения летних температур для всех станций наблюдались в 2012 г. Из этих значений максимум в $21,5$ °С был в Карасуке, минимум $14,2$ °С – в Северном. Самые низкие значения летних температур были в 1972 г. Самая низкая температура была в Северном ($14,2$ °С), а самая высокая – в Карасуке ($16,8$ °С).

Коэффициент тренда летних температур за период наблюдений составляет в среднем $0,12$ °С/10 лет. За первый период его значение было $0,08$ °С/10 лет, за второй период он увеличился до $0,13$ °С/10 лет.

Среднее значение летних температур мало изменилось для двух периодов. В первый период оно было $17,1$ °С, а во втором стало $17,6$ °С.

Выводы

Анализ рассчитанных данных позволяет сделать ряд выводов. Прежде всего, подтверждается отмеченный многими авторами вывод об изменении средней температуры воздуха в последнее время в сторону потепления [17 и др.].

Основные результаты сводятся к следующему.

1. Тренд среднегодовых температур за весь период наблюдений (85 лет, $a = 0,03 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$) показывает рост средней температуры по области за это время на $2,5 \text{ } ^\circ\text{C}$.

2. Температура воздуха в первый отрезок времени (1936–1977) имеет небольшой положительный тренд ($a = 0,09 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$) при отрицательной средней температуре ($-0,01 \text{ } ^\circ\text{C}$). Второй период характеризуется резким потеплением. Средняя температура за этот период составила $1,47 \text{ } ^\circ\text{C}$, коэффициент тренда $a = 0,25 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$. Следует отметить, что существенный вклад в распределение характеристик температур вносят отдельные экстремальные годы. Для Новосибирской области таких было два. На характеристики минимальных температур значительное влияние оказал 1969 г., а на максимальные характеристики – 2020 г.

Эти два года определяют экстремальные температуры для всех пунктов наблюдений и значительно влияют как на годовые температуры, так и на сезонные.

3. Характеристики температур в зимний и летний сезоны имеют свои особенности. Прежде всего это касается темпов потепления. Если в зимний период коэффициент тренда за полный период равен $0,48 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$, то в летний сезон всего $0,12 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$. Отличаются они и в разные временные отрезки. Средние температуры по области во втором рассматриваемом отрезке времени зимой оказались теплее на $2,5 \text{ } ^\circ\text{C}$, в то время как в летний сезон только на $0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$.

4. Оценки многолетних колебаний проведем, используя крайние квантили $T_{0,05}$ и $T_{0,95}$ для полного ряда наблюдений. Годы, значение температуры в которых «выходят» за границы интерквантильного расстояния, будем считать холодными или теплыми. Годы могут совпадать для отдельных пунктов или различаться. В зависимости от статистических параметров распределения ряда, в нем могут присутствовать несколько лет, удовлетворяющие условию, или не быть ни одного. Каждый из них учитывается как отдельная единица. Таким образом, общее количество годовых точек составляет $85 \times 19 = 1615$. Как и следовало ожидать, к холодным годам, с температурой ниже $T_{0,05}$ квантиля, можно суммарно отнести 75 лет из первого периода и 8 из второго. Все теплые годы приходятся на второй период (85 лет). Вывод можно сделать только один. Вторая половина периода теплее не только в средних параметрах, но и в значениях интерквантильных температур.

Литература

1. *Бедрицкий А.И., Блинов В.Г., Гершинкова Д.А., Голицин Г.С., Дымников В.П., Израэль Ю.А., Катцов В.М., Котляков В.М., Мелешико В.П., Осипов В.И., Семенов С.М.* (Ред.). Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 1. Изменения климата. М.: Росгидромет, 2008. 227 с.
2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме / Под ред. А.В. Фролова. М.: Росгидромет, 2014. 60 с.
3. *Груза Г.В., Рейтенбах Р.Г.* Статистика и анализ гидрометеорологических данных. Л.: Гидрометеониздат, 1982. 216 с.
4. *Ранькова Э.Я., Груза Г.В.* Индикаторы изменений климата России // *Метеорология и гидрология*. 1998. № 1. С. 5–18.
5. *Груза Г.В., Ранькова Э.Я.* Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата // *Метеорология и гидрология*. 2004. № 4. С. 50–66.
6. *Груза Г.В., Ранькова Э.Я.* Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2012. 194 с.
7. *Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Аблеева В.А., Быховец С.С.* Климат южного Подмосквья: современные тренды и оценка аномальности // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2017. № 4. С. 66–81.
8. *Ашабоков Б.А., Ташилова А.А., Кешева Л.А., Теунова Н.В., Таубекова З.А.* Климатические изменения средних значений и экстремумов приповерхностной температуры воздуха на юге Европейской территории России // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2017. № 1. С. 4–19.
9. *Ташилова А.А.* Квантильный анализ экстремумов осадков на юге Европейской части России // *Успехи современного естествознания*. 2021. № 11. С. 138–143.
10. *Сонечкин Д.М., Даценко Н.М., Иващенко Н.Н.* Оценка тренда глобального потепления с помощью вейвлетного анализа // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 1997. Т. 33, № 2. С. 184–194.
11. *Михалоп С.Г., Мингалев Д.Э., Евдокимов С.И.* Использование анализа временных рядов в изучении многолетних температурных изменений // *Вестн. ПсковГУ*. 2014. № 4. С. 17–24.
12. *Тимофеев А.А., Стерин А.М.* Применение метода квантильной регрессии для анализа изменений характеристик климата // *Метеорология и гидрология*. 2010. № 5. С. 27–41.
13. *Бардин М.Ю., Платова Т.В.* Изменения порогов экстремальных значений температур и осадков на территории России в период глобального потепления // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. 2013. № 25. С. 71–93.
14. *Стерин А.М., Лавров А.С.* Использование квантильной регрессии для оценки пространственных особенностей характеристик трендов приземной температуры на территории России // *Фундаментальные и прикладные материалы*. 2022. Т. 8, № 2. С. 238–257.

15. *Бардин М.Ю., Платова Т.В.* Изменения экстремальных квантилей распределения основных климатических переменных в Европейской части СНГ // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2013. № 27. С. 83–91.
16. *Воронина Л.В., Гриценко А.Г.* Климат и экология Новосибирской области. Новосибирск: СГГА, 2011. 228 с.
17. *Паромов В.В., Земцов В.А., Копысов С.Г.* Климат Западной Сибири в фазу замедления потепления (1986–2015 гг.) и прогнозирование гидроклиматических ресурсов на 2021–2030 гг. // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 1. С. 62–74.

МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОЗЕРА КУЧУКСКОЕ И ПОДЗЕМНЫЙ СТОК В ВОДООХРАННОЙ ЗОНЕ

О.В. Климов¹, С.П. Казмин²

¹ *ФГБУ «Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт», Новосибирск*

² *Западно-Сибирское отделение Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»», Новосибирск*

Дана характеристика современного морфометрического состояния оз. Кучукское, расположенного на юге Западной Сибири в Алтайском крае, условий береговых зон и подземного стока в водоохранной зоне, а также техногенного воздействия и предотвращения деградации экосистем бассейна водоема. Источниками питания рассматриваемого водного объекта являются талые воды сезонных снегов, дожди и грунтовые воды. Соблюдение водного режима на территории водоохранной зоны является составной частью комплекса мер по улучшению экологического состояния водного объекта.

Ключевые слова: *рапа, современная долина, поверхностные воды, грунтовый поток, сезонный сток, водный баланс.*

MORPHOMETRIC FEATURES OF KUCHUKSKOYE LAKE AND UNDERGROUND RUNOFF IN THE WATER PROTECTION ZONE

O.V. Klimov¹, S.P. Kazmin²

¹ *Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute, Novosibirsk*

² *West-Siberian Branch of the Forest Institute n. a. V.N. Sukachev SB RAS, branch of Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Research Center "Krasnoyarsk Scientific Center of the SB RAS", Novosibirsk*

The paper presents characteristic of the current morphometric state of the Kuchukskoye lake located in the south of Western Siberia in the Altai Territory, the conditions of coastal zones and underground runoff in the water protection zone, as well as technogenic impact and prevention of degradation of the ecosystems of the reservoir basin. The sources of nutrition for the considered water body are the melt waters from seasonal snows, rains and ground waters. Compliance with the water

regime on the territory of water protection zones is an integral part of a set of measures to improve the ecological state of a water body.

Key words: *brine, modern valley, surface waters, groundwater flow, seasonal runoff, water balance.*

Озеро Кучукское находится на территории Благовещенского района Алтайского края. Географические координаты: 52°47' с.ш. и 79°40'–79°52' в.д. от Гринвича. Форма эллиптическая, вытянутая с севера на юг длиной 18,0 км, шириной 11,5 км. Площадь акватории от 175 до 181 км²; глубина озера 2–2,2 м и только у юго-восточного берега достигает 2,7–3,1 м. Водоем представляет собой палеозалив Кулундинского озера, с которым соединен протокой [1–3]. Между озерами построена водорегулирующая плотина для поддержания уровня оз. Кучукское и обогащения его солями. В летнее время его уровень заметно снижается из-за добычи рапы. Месторождение целенаправленно изучается с 1927 г. институтами АН СССР, ВНИИ Галургии, ЗСГУ и др. Эксплуатация месторождения начата Кучукским сульфатным заводом в 1960 г. [4]. Промышленное освоение сульфата натрия с 1963 г. осуществляется путем закачки летней рапы озера, содержащей наибольшую концентрацию сульфата натрия, по специальному рапопроводу в садовый бассейн – оз. Селитренное [5]. При осенне-зимнем понижении температуры происходит садка мирабилита, после чего обессульфаченный маточник сбрасывают обратно в оз. Кучукское. Озеро Кучукское является единственным в Западной Сибири незамерзающим водоемом.

Природно-территориальные комплексы любого таксономического ранга представляют собой результат сложного взаимодействия компонентов макрорельефа, которые обладают различными стокоформирующими свойствами, специфичными для ландшафтов регионального и топологического уровня. На региональном уровне ведущая стокоформирующая роль принадлежит водно-тепловому балансу, обеспечивающему дифференциацию приходной части водного баланса, и макрорельефу территории как структурно организующему фактору стока. Его формы, послужившие геолого-геоморфологической основе ландшафтов для обособления физико-географических провинций, представлены возвышенностями, их склонами, замкнутыми низменностями, озерными понижениями, речными долинами, по-разному выполняющими стокоформирующую функцию. В совокупности с крутизной склонов эти особенности обеспечивают различную степень расчлененности и скорость освобождения территории провинции от выпавших осадков, условия инфильтрации и питания подземной части гидросферы [7]. На топологическом уровне преобладает ландшафтно-дифференцированное перераспределение осадков между частями водного баланса, включая транспирацию, поверхностный сток, инфильтрацию и т. д.

Согласно календарному плану к договору № 2021-82/ВБ от 6 декабря 2021 г. между ИГМ СО РАН и ФГБУ «СибНИГМИ», в период 10–20 июня 2022 г. были проведены полевые работы на оз. Кучукское и прилегающей к нему территории. Предшествующим видом исследований являлись следующие предполевые работы: сбор, обработка и анализ ранее полученных данных; изучение водных объектов и прилегающих территорий по разномасштабным топографическим картам и космическим снимкам высокого разрешения с помощью компьютерного программного обеспечения ArcGIS. Собранный материал позволил определить объем полевых исследований, необходимых для выполнения поставленных задач. Полевые работы производились в соответствии с требованиями действующих нормативных документов. Основой проведения исследований являлось получение специализированной гидрологической информации (морфометрических особенностей) по форме 6.1 водных объектов [8] и решение следующих задач: а) определение морфометрических характеристик оз. Кучукское; б) обследование водотоков и исследование разгрузки подземных вод в водоохранной зоне вдоль побережья озера.

При рекогносцировочном обследовании с помощью навигатора GPS-MAP 60CSx компании Garmin (США) на местности были уточнены географические координаты и места заложения четырех гидрометрических створов (одного продольного и трех поперечных) на оз. Кучукское (рис. 1).

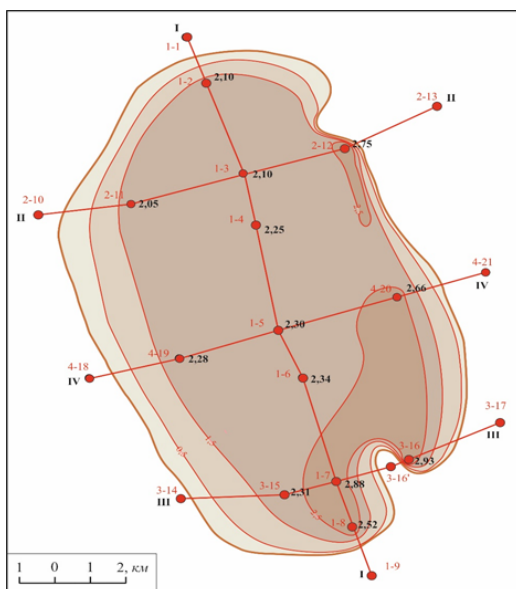


Рис. 1. Места расположения гидрометрических створов

Гидрологические работы в июне 2022 г. сотрудниками ФГБУ «СибНИГМИ» проводились на двухместной резиновой лодке и арендованной лодке с мотором. В створах были установлены репера водомерных постов с нумерацией нуля графика, т. е. отметки высоты, относительно которой измеряется уровень воды. Измерения глубин проводились при помощи эхолота-навигатора Mark-4 фирмы Lowrance с точностью до 0,1 м. Все точки промеров привязаны к координатной сетке в системе WGS 1984 при помощи GPS-приемника GPSMAP 60CSx компании Garmin (США). Маршрутные точки, маршруты и треки были переданы с устройства Garmin на электронные карты при помощи программы MapSource. Глубина рассматриваемого водоема приведена на батиметрической карте (рис. 2).

Водоохранной зоной является территория, прилегающая к водоему и водотоку, на которой устанавливается специальный режим хозяйственной деятельности в целях предотвращения загрязнения, засорения, истощения вод и заиления водных объектов [9]. Соблюдение специального режима на территории водоохранных зон является составной частью комплекса природоохранных мер по улучшению гидрологического режима и экологического состояния, благоустройству прибрежной территории водного объекта. Площадная оценка участков экосистем водоохранных зон водных

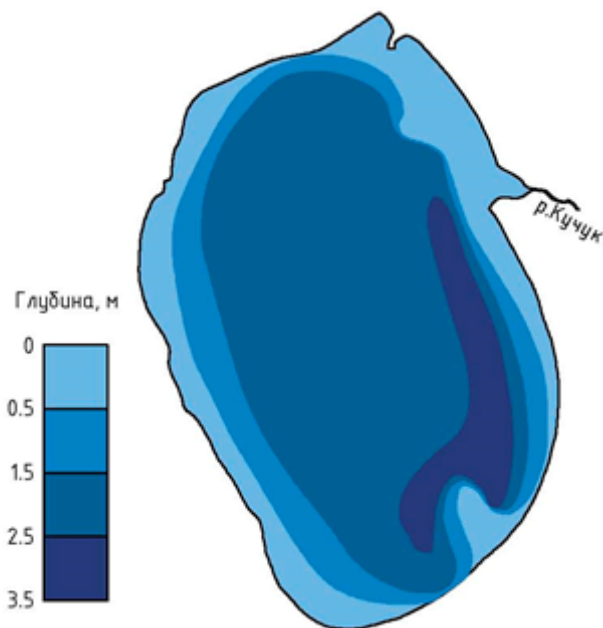


Рис. 2. Батиметрическая карта (оз. Кучукское 14–20 июня 2022 г.)

объектов необходима для выявления динамики изменения площадей залуженных участков, зон под кустарниковой растительностью и участков под древесной и древесно-кустарниковой растительностью. В границах водоохранных зон устанавливаются прибрежные защитные полосы, на территории которых вводятся дополнительные ограничения хозяйственной и иной деятельности. Протяженность оз. Кучукское – 18 км, ширина – 11,5 км. Согласно Водному кодексу РФ [9], водоохранная зона для данного водоема принята в размере 100 м. В летний период производилось обследование водоохранной зоны вдоль побережья озера, при котором определялось наличие эрозионных процессов на пойме. При дешифрировании и анализе космоснимков, топокарт различного масштаба выявлено состояние экосистем – природные естественные ландшафты и нарушенные антропогенные площади на исследуемых участках. Поток поверхностных и подземных вод зависит от геоморфологии района и направлен от возвышенных поверхностей в сторону понижения [10] (рис. 3).

Учитывая разгрузку грунтового потока в поверхностные воды, кроме определения морфометрических показателей озера, на р. Кучук в ее низовье при впадении в водоем (рис. 4) был установлен гидрометрический промерный створ, где определялись глубина, скорость течения, расход воды в водоохранной зоне.

Подземные воды образований приурочены к горизонтам и линзам песков различного грансостава. Глубина залегания подземных вод – до 500–800 м, грунтовых вод – от 0,2 до 10 м. Условия распространения зависят от литолого-стратиграфических и фациальных особенностей водовмещающих пород. Подземные воды водоносных комплексов обладают значительным напором – от 20 до 700 м, местами статические уровни в пробуренных скважинах, оборудованных на меловой водоносный горизонт,

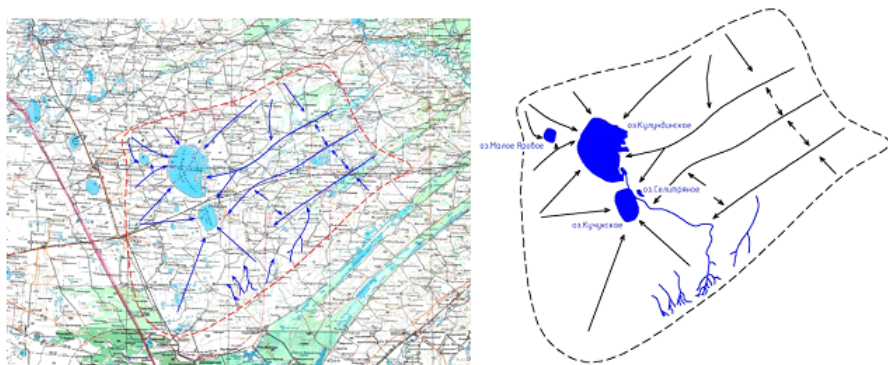


Рис. 3. Схема водосбора региона исследований



Рис. 4. Река Кучук при впадении в озеро Кучукское (а – космоснимок, б – на местности)

устанавливаются на отметках +15...+25 м (таких скважин на рассматриваемой территории нет, в связи с этим подземные водоносные комплексы не связаны с грунтовыми водами и не питают их). Минерализация подземных вод колеблется от 0,5–1,0 до 2–5 г/дм³.

Для установления направления потока грунтовых вод в области питания их на возвышенных участках, в области транзита (на склонах приподнятой местности) и на участке разгрузки (в прибрежной части поймы оз. Кучукское) были пробурены скважины ручным буром «Мечта геолога». Уровень грунтовых вод в зондировочных скважинах ручного бурения измерялся хлопущкой, в ранее пробуренных наблюдательных скважинах – уровнемером скважинным УЭ-100. Грунтовые воды приурочены к различным генетическим отложениям четвертичного возраста. Распространение подземных вод, залегающих первыми от земной поверхности, и глубина их залегания тесно увязываются с основными геоморфологическими элементами, современными ландшафтными комплексами. Взаимосвязь глубин залегания грунтовых вод, их минерализации отмечается с определенными типами местности. В 2000–2018 гг. на прилегающей к оз. Кучукское территории из грунтового горизонта с разной периодичностью отбирались пробы на химанализ из 1773 скважин с глубин 1–17,5 м. Минерализация колеблется от 0,5 г/дм³ и выше до рассолов, увеличиваясь на низких озерных террасах. Преобладают грунтовые воды сульфатно-хлоридного и хлоридно-сульфатного типа.

Питание грунтовых вод осуществляется в основном за счет инфильтрации атмосферных осадков и поверхностных водотоков. Особенностью режима грунтовых вод является четко выраженный подъем уровней в весенне-летний период и постепенный спад уровней в летне-осенне-зимний период. В отдельные многогодные годы наблюдается некоторое повышение уровня грунтовых вод в летне-осенний период за счет инфильтрации дождевых осадков. Весенний подъем уровней ярко выражен и длится сравнительно недолго, затем наступает постепенный спад уровня, достигающий своего минимума в марте–апреле.

Минерализация грунтовых вод также изменяется в течение года. В период весенне-летнего максимума отмечается некоторое уменьшение минерализации грунтовых вод, а в зимний период – увеличение.

Режимные наблюдения показывают, что годовая амплитуда колебаний уровней грунтовых вод может быть определена для пойм и низких террас до 1,5–2 м, сезонных – до 0,2–0,4 м. С эпохами минимальных значений солнечной активности увязывается максимальное положение уровней грунтовых вод и наоборот [11].

Водно-солевой баланс тесно связан с водо- и солепереносом в гидросфере и атмосфере [12]. Их функцией является гидрохимический сток, включающий поступление солей с атмосферными водами, перераспределение водами склонового стока, речными, озерными и подземными водами. Гидрохимические процессы, развиваясь во времени, формируют в большей или меньшей степени устойчивые галогидрохимические структуры. С явлениями формирования, перераспределения воды и солей связано образование стока, химического состава поверхностных и подземных вод, соленакопление в почвах и нижележащих отложениях или их рассоление. В связи с ними при наличии благоприятных условий протекают процессы заболачивания, суффозионно-просадочные, карстовые, эрозионные, включая засоление – рассоление, которые существенным образом влияют на современное состояние территории [3, 10, 13].

Днище оз. Кучукское лежит выше первого выдержанного водоупора, который перекрыт надводоупорной толщей. В ней формируются грунтовые воды, для которых озеро – основной участок разгрузки, как и для сравнительно небольшой р. Кучук. В озере идет активная садка солей, образуя пластовые залежи мирабилита. Характерной особенностью является смыкание уровня воды в озере с зеркалом грунтовых вод и непосредственная связь озерных и грунтовых вод. Связь эта имеет двухсторонний характер в зависимости от положения уровней. Во влажные годы или периоды года с повышенным увлажнением уровень грунтовых вод находится выше уреза воды в озере. Озеро дренирует грунтовые воды, с которыми поступают в него и соли. Другие источники воды и солей – атмосферные осадки и поверхностные воды водотоков [14].

Единственная статья расхода воды при таком положении уровней – испарение. Зимой (обычно во второй ее половине или в конце) взаимное положение зеркала грунтовых вод и озера изменяется, что создает условия, благоприятные для инфильтрации воды из озера и удаления какого-то количества солей. Такая возможность наблюдается иногда и в засушливые периоды летом. Таким образом, поддерживается промывной режим озера и исключается накопление в нем избыточных солей. Если этот режим нарушается в результате кольматации донных отложений или по каким-то другим причинам, то минерализация воды в озере увеличивается. Вокруг

озера образуются пояса засоления. Там, где берега низкие, грунтовые воды залегают неглубоко от поверхности. Но под воздействием проявляющейся здесь активной транспирации и испарения зеркало грунтовых вод отжимается, образуя депрессионный желоб, в который устремляются не только грунтовые воды, фильтрующиеся в сторону озера, но и воды (и соли) из озера. Химический состав грунтовой воды в пределах депрессионного желоба формируется в результате смешивания грунтовых вод, фильтрующихся в сторону озера и из него. Почвы вокруг озера в зоне депрессионной воронки быстро засоляются. Сама зона отчетливо обозначена обильными выпотами солей на поверхности.

Важнейшими гидрохимическими показателями поверхностных и грунтовых вод являются минерализация, объем выносимых стоками солей и их модуль, отнесенный к определенной площади (км^2), химический состав воды. Необходимы представления об их изменении во времени в течение года и по площади. Для этой цели рекомендуется пробурить три куста на грунтовые воды с тремя наблюдательными скважинами в каждом: а) в северной части оз. Кучукское со стороны оз. Кулундинское, б) в междоузье Селитряное–Кучукское, в) между запруженной частью р. Кучук и озером Кучукское. Глубина скважин до 7 м. Расстояние между скважинами на каждом кусте в зависимости от условий на местности 50–100 м. Во всех скважинах в течение 5 лет необходимо ежемесячно проводить мониторинг грунтовых вод – замеры глубины залегания, отбор в соответствии с требованиями ГОСТ Р 59024-2020 «Вода. Общие требования к отбору проб» и анализ стандартного химического состава в соответствии с существующими нормативными руководствами и инструкциями в аккредитованных аналитико-технологических испытательных центрах.

Основные слагаемые приходной части водного баланса оз. Кучукское составляют осадки на поверхность озера, подземный приток в весенне-летне-осенний периоды, сток р. Кучук и сток с площади, непосредственно примыкающей к озеру (боковой приток). Ведущая роль в формировании водного баланса принадлежит атмосферным осадкам. Единственной статьей расхода водного баланса озера является величина испарения. Уникальность рассматриваемого водоема состоит в том, что в зимний период грунтовые воды питаются с озера, так как поток направлен с озера, в связи с повышенным уровнем и отсутствием покрытия ледовым слоем.

Литература

1. Баталин Ю.В., Эдигер В.Г. Гидрохимический режим и геологическое строение оз. Кучук // Нерудные ископаемые Западной Сибири. Казань, 1971. Вып. 32. С. 68–94.
2. Геология и полезные ископаемые России: В 6 т. Т. 2. Западная Сибирь / Под ред. А.Э. Конторовича, В.С. Суркова. СПб.: ВСЕГЕИ, 2000. 477 с.

3. Западная Сибирь / Отв. ред. Г.Д. Рихтер. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 488 с.
4. *Каишаров О.Д., Микицинский В.В.* Проект кондиций на рапу озера Кучук. Л.: ВНИИГ, 1960. 101 с.
5. Производство сульфата натрия из рассолов озера Кучук / Под ред. Е.Е. Фроловского. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2001. 444 с.
6. *Винокуров Ю.И., Цимбалей Ю.М.* Ландшафтная индикация в эколого-географических исследованиях. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2016. 258 с.
7. *Казьмин С.П.* Основа рационального природопользования Западной Сибири. Красноярск: ИЛ СО РАН, 2019. 212 с.
8. Об утверждении форм и порядка представлений сведений, полученных в результате наблюдений за водными объектами, заинтересованными федеральными органами исполнительной власти, собственниками водных объектов и водопользователями: Приказ МПР РФ от 6 февраля 2008 г. № 30 (ред. от 13.04.2012 № 105; от 30.03.2015 № 153).
9. Водный кодекс Российской Федерации от 3 июня 2006 г., № 74-ФЗ (ред. от 28.04.2023).
10. Инженерная геология СССР: В 8 т. Т. 5. Алтай, Урал / Под ред. Е.М. Сергеева. М.: Изд-во МГУ, 1978. 219 с.
11. *Казьмин С.П.* Гидрогеологические особенности покровных субаэральных отложений на юге Западной Сибири // *Фундаментальные проблемы квартера: итоги изучения и основные направления дальнейших исследований: Материалы VI Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода (Новосибирск, 19–23 октября 2009 г.)*. Новосибирск, 2009. С. 249–251.
12. *Силецкий К.Н.* Условия формирования теплового и водного балансов сульфатных озер Кулунды (на примере оз. Кучук): Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Новосибирский гос. педагогический ин-т. Иркутск, 1967. 32 с.
13. *Лузгин Б.Н.* Формирование антропогенно-природных катастрофических ситуаций (на примере Алтайского региона): Автореф. науч. доклада. ... д-ра геогр. наук. Томск, 2006. 79 с.
14. *Винокуров Ю.И.* Ландшафтные индикаторы инженерно- и гидрогеологических условий Предалтайских равнин. Новосибирск: Наука, 1980. 196 с.

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ БАСЕЙНА-ИМИТАТОРА ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО УЧЕТА ИСПАРЕНИЯ С ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВОДОХРАНИЛИЩА

И.Л. Калюжный

*ФГБУ «Государственный гидрологический институт»,
Санкт-Петербург*

В целях оперативного управления водным ресурсом конкретного водохранилища разработана методика расчета конструктивных элементов бассейна для определения суточных величин испарения. В качестве примера произведен расчет бассейна-имитатора для наливного водохранилища. Исходными данными расчета являются факторы внешней среды: суммарная и отраженная солнечная радиация, температура воздуха; факторы водной массы: глубина проникновения солнечной радиации, прозрачность и мутность воды; высота борта бассейна, альbedo внутренней стороны его поверхности. Реализация метода расчета основана на установлении связи разности радиационного баланса, турбулентного теплообмена с атмосферой и теплообмена в воде с величинами разности между испарением с водоема и бассейна-имитатора. Показано, что при погрешности менее 1,0 мм/сут площадь его водного зеркала равна 29,6 м², глубина – 3 м, альbedo надводной части – 0,70, а подводной – 0,1.

***Ключевые слова:** бассейн-имитатор, методика расчета, водохранилище, факторы внешней среды.*

RATIONALE FOR THE DESIGN OF A SIMULATOR POOL FOR OPERATIONAL ACCOUNTING FOR EVAPORATION FROM THE WATER SURFACE OF A RESERVOIR

I.L. Kalyuzhny

State Hydrological Institute, St. Petersburg

For the purpose of operational management of the water resource of a particular reservoir, a methodology has been developed for calculating the structural elements of the pool used to determine the daily values of evaporation. As an example, a simulator pool was calculated for a off-stream reservoir. The initial calculation data are environmental factors: total and reflected solar radiation, air temperature; water mass factors: penetration depth of solar radiation, water

transparency and turbidity; the height of the side-board of the pool, the albedo of the inner side of its surface. The implementation of the calculation method is based on establishing a connection between the difference in the radiation balance, turbulent heat exchange with the atmosphere, and heat exchange in water, and the difference between evaporation from the reservoir and from the simulator pool. It is shown that with an error of less than 1.0 mm/day, the area of its water table is 29.6 m², the depth is 3 m, the albedo of the above-water portion of side board is 0.70, and of the underwater portion is 0.1.

Key words: *simulator pool, calculation method, reservoir, environmental factors.*

Введение

Определению испарения с водной поверхности объектов вод суши уделяется значительное внимание со стороны специалистов различных направлений науки и практики. По этой проблеме имеются многочисленные научные публикации и ряд разнообразных приборов, позволяющих измерять величину испарения с той или иной достоверностью. Разнообразные конструкции испарителей удовлетворяли требованиям уравнения водного баланса изолированного объема воды. Их конструктивные характеристики определялись путем полевых экспериментальных исследований [1–3]. Многолетние поиски различных вариантов испарителей, выполненные под эгидой Всемирной метеорологической организации в ряде стран, позволили обосновать применение испарителя класса А (США), ГГИ-3000 (СССР) и испарительного бассейна площадью 20 м².

Дальнейшее усовершенствование испарителя ГГИ-3000 позволило, как в СССР, так и в США, создать теплоизолированный испаритель. В основу его создания положено условие, что погрешность в определении величины испарения за счет теплообмена испарителя с грунтом не должна превышать величины инструментальной ошибки определения уровня воды в испарителе (в эквивалентном тепловом выражении) [4, 5]. Устранение теплообмена водной массы испарителя с грунтом приблизило показание этого прибора к величинам испарения, определяемым по испарительному бассейну, установленному в грунте или на плоту в водоеме [6]. Поиски возможностей свести к минимуму эти различия не нашли окончательного решения.

Основная цель настоящей работы заключается в создании бассейна-испарителя, учитывающего основные факторы, влияющие на процесс испарения с конкретного водоема. Параметры такого бассейна должны минимизировать разность в потерях воды на испарение в бассейне и водохранилище. Условно такой прибор можно назвать «бассейн-имитатор». Идея создания бассейна-имитатора, являющегося продолжением работы [4], была обоснована В.С. Голубевым и И.Л. Калюжным.

Объект исследования и методы определения его характеристик

Обоснование методики расчета бассейна-имитатора рассматривается на примере наливного водохранилища сезонного регулирования. Наполнение водохранилища осуществляется в осенне-зимний период; выпуск воды происходит в весенне-летний период при поливах сельскохозяйственных земель. За время заполнения водохранилища отметка его водного зеркала поднимается почти на 30 м, а площадь поверхности увеличивается от 20 до 70 км² и более. В наполненном состоянии площадь водохранилища равна 77,35 км², при минимальном уровне – 22,28 км². Наибольшая глубина 40 м; средняя – 20 м. Его емкость – 1,5 млрд м³ воды. Оперативный учет площади водного зеркала производится на основе ежедневных водомерных наблюдений с использованием установленной зависимости площади зеркала от отметки уровня воды в водохранилище.

В процессе полевых работ, охватывающих все фазы эксплуатации водохранилища, определялся ряд характеристик его водной массы.

Для оценки величины проникновения солнечной радиации в водную толщу использовался подводный пиранометр. Одновременно с этими измерениями проводилось определение альбедо водной поверхности, с помощью походного пиранометра, и его зависимости от высоты солнца, а также глубины прозрачности воды с использованием белого диска. При всех определениях использовались методики, применяемые в системе Росгидромета [7]. Атмосферные осадки в период сработки водохранилища отсутствовали.

Исходными данными для выполнения этой разработки послужили результаты научных исследований, изложенные в монографии [8], в нормативном документе [9], в статьях [4, 11–13], а также результаты полевых измерений.

Общее уравнение связи между величинами испарения с водохранилища и бассейна-имитатора

Определение величины испарения с водной поверхности бассейна-имитатора, как и других подобных приборов, основано на уравнении водного баланса

$$E = h_n - h_k + P, \quad (1)$$

где h_n и h_k – отметка уровня воды в бассейне в начальный и конечный сроки измерений; P – слой осадков между сроками измерений.

Согласно уравнению (1), корпус бассейна не должен иметь течи, а величины осадков, измеренные в отдельном наземном осадкомере, должны соответствовать величинам, учтенным бассейном-имитатором.

Уравнение связи между величинами испарения бассейна (E_6) и водоема (E) в общем виде можно выразить следующим образом

$$E = E_6 + \Delta E, \quad (2)$$

где ΔE – разность между испарением с водоема и с имитатора.

Оценим влияние конструкционных элементов имитатора на ΔE , аналогично работе М.П. Тимофеева [8], путем сравнения уравнений теплового баланса для водоема

$$R = LE + P + B \quad (3)$$

и бассейна-имитатора

$$R_6 = LE_6 + P_6 + B_6, \quad (4)$$

где R и R_6 – соответственно, радиационный баланс водоема и бассейна-имитатора.

Для разности испарения с поверхности водоема и бассейна-имитатора, согласно выражениям (3) и (4), получаем выражения

$$E = 1/L (\Delta R - \Delta P - \Delta B), \quad (5)$$

где L – теплота парообразования; ΔR , ΔP и ΔB – соответственно, разности радиационного баланса, турбулентного теплообмена с атмосферой и теплообмена в воде.

Исследуя составляющие уравнения (5), М.П. Тимофеев [8] пришел к убедительным выводам о том, что для интервалов «сутки и более» возможно непосредственно использовать данные испарительного бассейна для определения величины испарения с водоема. Такой метод определения величины испарения с водоема имеет то преимущество, что он включает надежно определяемую величину испарения с бассейна-имитатора.

Обоснование связей характеристик бассейна-имитатора с факторами, обуславливающими испарение с водохранилища

Реализация этого метода требует установления связи слагаемых уравнения (5) с величиной ΔE . В работе [11] показано, что разность радиационного баланса в области коротковолнового излучения связана с высотой бортика бассейна, его диаметром, отражательными свойствами надводной и подводной частей его внутренней поверхности.

Разность теплообмена в воде обусловлена глубиной бассейна-имитатора, его теплоизолирующими свойствами и свойствами воды, которые характеризуют функцию поглощения коротковолновой солнечной радиации.

Разность радиационного баланса в области длинноволнового излучения и разность турбулентного теплообмена с атмосферой зависят в основ-

ном от разности температур поверхности воды водоема и бассейна-имитатора.

Анализ условий формирования теплового баланса водоема и бассейна-имитатора показывает, что конструктивными элементами бассейна-имитатора, определяющими величину поправки к суточным суммам измеряемого испарения, будут:

- высота надводной части (бортика) бассейна (Z);
- диаметр ($2r$) и глубина бассейна (H);
- толщина корпуса (δ) и теплопроводность его материала (λ);
- отражательные свойства покрытий надводной и подводной частей внутренних поверхностей бассейна.

Фактором, обуславливающим высоту бортика бассейна, является установленная экспериментальным путем высота, которая должна препятствовать разбрызгиванию капель дождя при их попадании на поверхность воды бассейна. Согласно работам [12, 13], этому положению соответствует высота бортика в 30 см.

Диаметр бассейна может быть вычислен из условия задания величины $L(\Delta E)$ по выражению

$$R_0 - R_z = S(1 - A)(1 - \eta)(1 - A_z) \leq L(\Delta E), \quad (6)$$

где $R_0 - R_z$ – баланс коротковолновой солнечной радиации, прошедшей через единицу водной поверхности бассейна-имитатора при высоте бортика, равной 0 и Z (см) соответственно; S – величина прямой солнечной радиации, падающей на единицу горизонтальной поверхности; A и A_z – соответственно, альbedo водной поверхности и внутренней поверхности надводной части бортика бассейна для прямой солнечной радиации; η – доля площади водной поверхности бассейна, на которую попадают прямые солнечные лучами, равна [11]

$$\eta = (\alpha/180) - (1/\pi) \sin \alpha, \quad (7)$$

где α – центральный угол сегмента (в градусах), величина которого зависит от отношения диаметра бассейна ($2r$) к надводной части бортика (Z) и угла высоты солнца (h_\odot), определяется из выражения

$$\alpha = 2 \arctg \sqrt{\left(\frac{2r}{z}\right)^2 \operatorname{tg}^2 h - 1}. \quad (8)$$

Покрытие надводной части внутренней поверхности бортика испарителя осуществляется путем нанесения белой краски (цинковых белил), обеспечивающей альbedo, близкое к 0,7. Покрытие подводной части внутренней поверхности бака выбирается из условий: его альbedo должно быть меньше альbedo водной поверхности водоема при высотах солнца более 45°. Покрытие подводной части бассейна должно быть черного цвета.

Глубина бассейна-имитатора определяется из условий задания величины $L(\Delta E)$ и функции убывания радиации с глубиной. Приближенно эта зависимость аппроксимируется экспоненциальным законом, в виде уравнения

$$Q_H = Q_0 (1 - A) e^{-aH}, \tag{9}$$

где a – коэффициент ослабления радиации; H – глубина; Q_0 – суммарная солнечная радиация, падающая на поверхность воды; A – альbedo водной поверхности водоема; e – основание натуральных логарифмов.

Учитывая, что коэффициент ослабления радиации зависит от замутненности водоема, глубина бассейна-имитатора может значительно варьировать. Поэтому оценка глубины должна производиться с учетом характеристик вод конкретного водоема. Отсюда следует что, глубина бассейна определяется из условия

$$Q_H \leq L(\Delta E). \tag{10}$$

Толщина боковой стенки (δ_1) и дна (δ_2) бассейна может быть определена на основе сведений о теплоизоляционных свойствах используемого материала согласно выражению

$$1/\pi r^2 (q_1 F_1 + q_2 F_2) \leq L(\Delta E), \tag{11}$$

где q_1 и q_2 – отток или приток тепла через единицу поверхности бассейна, соответственно, боковой стенки площадью F_1 и дна – F_2 .

Для стационарных условий теплообмена взаимосвязь между толщиной корпуса и погрешностью можно записать в следующем виде

$$\lambda \tau [2n \Delta T_1 / r^2 Ln (r^2 + q_1 r/r) + \Delta T_2 / q_2] \leq L(\Delta E), \tag{12}$$

где λ – коэффициент теплопроводности выбранного материала; ΔT_1 и ΔT_2 – перепад температур на боковой стенке и дне; τ – продолжительность временного интервала; r – радиус бассейна; H – глубина бассейна.

Устранение теплообмена водной массы испарителя с грунтом, посредством применения теплоизоляционных покрытий на внешней поверхности бассейна, приближает показания бассейна-имитатора к величинам испарения с водохранилища, но не учитывает ряд иных факторов, обуславливающих испарение.

Исходные данные для расчета элементов бассейна-имитатора

Выбор размеров конструкционных элементов бассейна-имитатора зависит от задаваемой погрешности определения испарения и комплекса гидрометеорологических характеристик, относящихся к району расположения водохранилища. Часть из них (полуденная высота солнца, суммар-

ная и прямая солнечная радиация, внутригодовое распределение и величина атмосферных осадков) может быть получена из режимно-справочных изданий. Другая часть сведений (альbedo водной поверхности и проникающая в воду радиация) должна быть получена в результате полевых работ непосредственно на водохранилище.

Измерение альbedo водной поверхности водохранилища и оптических свойств его водной массы производилось в период с 21.04.1989 по 01.11.1989 г. Всего произведено 91 измерение при высотах солнца от 16 до 73°. Измерения производились на расстоянии 600–800 м от плотины водохранилища.

Результаты измерений приведены на рис. 1. Зависимость осредненных значений альbedo суммарной радиации от высоты солнца при условии безоблачного или малооблачного неба, а также слабого волнения имеет следующий вид:

$$A = 5 \left[1 + 0,008e^{2,5\pi(1-h_{\odot}/90)} \right], \quad (13)$$

где A – альbedo (%); h_{\odot} – угол высоты солнца (°); e – основание натурального логарифма.

Отдельные измерения альbedo при близких высотах солнца имеют значительный разброс, что может быть обусловлено как различиями соотношений рассеянной и прямой солнечной радиации, так и различиями в содержании взвесей в воде водохранилища.

Произведенные оценки показывают, что при высотах солнца более 35° от водной поверхности отражается только 5–10 % падающей солнечной радиации, а 95–90 % ее проникает в водную толщу и после преломления и многократного рассеяния преобразуется в тепловую энергию.

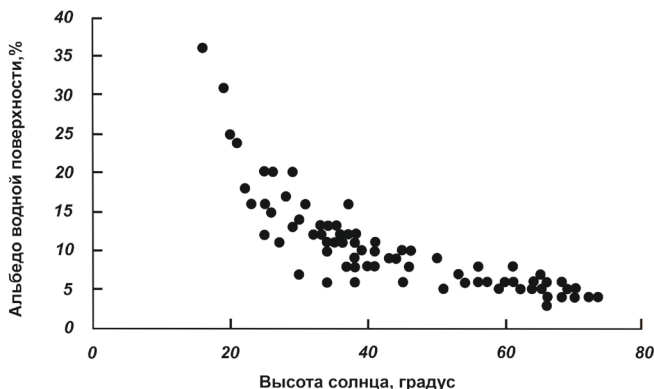


Рис. 1. Зависимость альbedo водной поверхности водохранилища от высоты солнца

Теоретически количество проникающей на глубину солнечной радиации может быть описано формулой Ламберта [9]. Она справедлива для воды, не содержащей примесей. В природных водах на коэффициент поглощения оказывают влияние как длина волны, так и наличие в воде растворенных, взвешенных и красящих веществ. Поэтому коэффициент поглощения изменяется в широких пределах и непропорционален длине световой волны. Поэтому одновременно с измерением проникающей радиации и альбедо водной поверхности проводились измерения глубины прозрачности воды с помощью белого диска (диск Секки). За период с апреля по ноябрь 1989 г. было произведено 18 серий измерений.

Анализ материалов измерений показывает (рис. 2), что доля солнечной радиации, проникающей на различные глубины водохранилища, в значительной мере зависит от относительной глубины прозрачности его вод. Относительная глубина прозрачности этого водохранилища имеет свой специфический режим и изменяется от 0,7 до 8,0 м и более.

Особенности режима относительной глубины прозрачности вод водохранилища связаны с режимом его заполнения и сработки (опорожнения). Водохранилище заполняется водами, богатыми взвешенными наносами. Мутность воды, перекачиваемой в водохранилище из подводящего канала, колеблется от 385 до 1396 г/м³. При этом фракции диаметром более 0,01 мм осаждаются в водохранилище, а фракции менее указанного размера проходят через него транзитом.

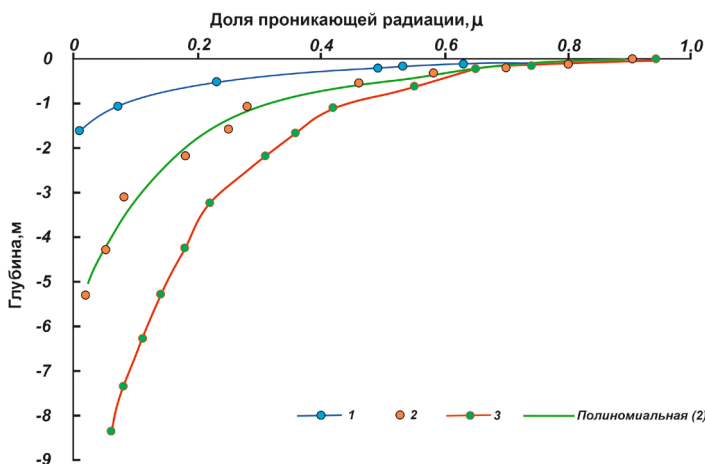


Рис. 2. Зависимость доли проникающей радиации (μ) на различную глубину (Z) водохранилища от относительной глубины прозрачности воды (C).

Условные обозначения: 1 — $C = 0,7$ м; 2 — $C = 2,9$ м; 3 — $C = 8,9$ м

Осаждению взвешенных частиц и осветлению вод, после прекращения наполнения водохранилища, способствует повышенная минерализация воды, от 0,65 до 0,97 г/дм³.

Графический анализ всей совокупности материалов по измерению проникающей радиации позволил установить зависимость коэффициента ослабления от глубины (Z) и относительной глубины прозрачности воды (C):

$$Q_z = Q_0 (1 - A) e^{-(1,34/\sqrt{C}) + 0,46\sqrt{Z}}, \quad (14)$$

где e – основание натурального логарифма; Q_0 – падающая суммарная радиация; A – альbedo.

Для отыскания численных значений коэффициентов в формуле (14) обработка материалов измерений была произведена в следующей последовательности. В начале для каждого измерения был вычислен коэффициент, характеризующий относительное ослабление радиации с глубиной

$$\mu_z = Q_z / Q_0 (1 - A). \quad (15)$$

Затем для всей совокупности измерений были вычислены отношения $\ln \mu_z / \sqrt{z} = f(C)$, которые были сгруппированы по градациям значений относительно глубины прозрачности воды (табл. 1).

Далее графически была определена эмпирическая зависимость между μ_z , Z и C :

$$-\ln \mu_z / \sqrt{z} = [0,46 + 1,34(1/\sqrt{C})] \quad (16)$$

и

$$\mu_z = e^{-[(1,34 + 0,46)\sqrt{z}]}. \quad (17)$$

Пространственно-временной анализ относительной глубины прозрачности воды водохранилища (табл. 2) показывает, что наибольшая прозрачность воды приходится на вторую половину апреля и достигает почти 9 м по всей акватории. Однако такая прозрачность воды сформировалась при отсутствии заполнения водохранилища в течение двух месяцев. При воз-

Т а б л и ц а 1

Осредненные значения параметров функции ослабления солнечной радиации

Параметр	Относительная глубина прозрачности вод, μ_z					
	8,7	5,6	4,5	2,6	1,4	0,7
$\ln \mu_z / \sqrt{z}$	-0,88	-1,44	-1,12	-1,28	-1,72	-2,00
$1/\sqrt{C}$	0,34	0,42	0,47	0,62	0,85	1,19

Таблица 2

Глубина относительной прозрачности водохранилища, м

Дата	Место измерений				Примечание
	у плотины № 2	между плотинной № 2 и центром	в центре	между центром и плотинной № 1	
20.04.1989	8,9	8,8	8,10	8,5	Нет закачки
23.05.1989	6,2	6,3	6,1	2,3	Есть закачка
24.05.1989	5,6	4,6	2,6	1,8	Есть закачка
25.05.1989	5,7				Есть закачка
29.05.1989	4,5				Есть закачка
31.05.1989	5,6				Нет закачки
08.08.1989	1,2				Нет закачки
09.08.1989	1,2				Нет закачки
10.08.1989	1,2				Нет закачки
30.08.1989	2,5				Есть закачка
31.10.1989	2,8				Есть закачка
01.11.1989	2,3				Есть закачка

обновлении закачки прозрачность воды убывает довольно резко. По мере роста температуры воздуха и воды прозрачность водохранилища падает почти до 2 м и начинает возрастать до 2–3 м лишь в октябре–ноябре в период закачки.

Таким образом, в режиме прозрачности водохранилища можно выделить следующие периоды:

1. Период заполнения водохранилища. Обычно этот период длится с сентября по февраль. Глубина относительной прозрачности вод в этот период составляет 2–3 м и зависит от мутности закачиваемой воды.

2. Период отстоя. Этот период приходится на март–апрель. При отсутствии налива воды и сбросов происходит осаждение взвешенных частиц. Глубина прозрачности быстро увеличивается с 2–3 до 8–9 м.

3. Период сработки водохранилища. В этот период изменения прозрачности воды наибольшие, от 8–9 в конце апреля до 1–2 м в августе. В период сработки уменьшение глубины прозрачности обусловлено несколькими причинами. К ним могут быть отнесены развитие фитопланктона, взмучивание, вызванное сработкой водохранилища и уменьшением его общей глубины, а также возрастания запыления атмосферы в летний период.

Рассматриваемый район характеризуется незначительными суммами атмосферных осадков. Атмосферные осадки выпадают в основном в те-

Таблица 3

**Прямая солнечная радиация на горизонтальную поверхность, кВт/м²
по наблюдениям сети актинометрических станций (38° с.ш.)**

Месяц	Прямая радиация в часы местного среднесолнечного времени					Сумма за сутки
	6 ч 30 мин	9 ч 30 мин	12 ч 30 мин	15 ч 30 мин	18 ч 30 мин	
01		0,28	0,45	0,16		6,29
02		0,38	0,57	0,26		12,44
03	0,04	0,51	0,69	0,36		16,89
04	0,10	0,61	0,80	0,45		20,95
05	0,19	0,68	0,84	0,51	0,02	23,51
06	0,20	0,69	0,84	0,53	0,03	24,18
07	0,16	0,64	0,80	0,52	0,05	22,71
08	0,13	0,60	0,77	0,46	0,02	20,82
09	0,06	0,54	0,71	0,36		17,47
10	0,02	0,48	0,60	0,20		13,53
11		0,41	0,48	0,13		10,01
12		0,28	0,42	0,10		7,16

чение декабря–апреля. Их месячная сумма варьирует от 3 до 90 мм. В летние месяцы они, как правило, отсутствуют.

Прямая и суммарная солнечная радиация на горизонтальную поверхность характеризуется значениями, близкими к условиям безоблачного неба, так как в рассматриваемом регионе очень большое число ясных дней и низкий балл общей и нижней облачности (табл. 3).

Определение размеров конструктивных элементов бассейна-имитатора

В состав конструктивных элементов бассейна-имитатора входят высота бортика, выступающего над водной поверхностью, и покрытие его внутренней поверхности, диаметр емкости, ее глубина, покрытие подводной части боковой поверхности и дна, толщина боковой стенки и дна.

Установлено, что высота бортика, равная 30 см, надежно гарантирует от выбрызгивания дождевых капель и появления систематических ошибок при измерении испарения. При такой высоте бортика ошибка в определении испарения не превысит 0,2 мм/сут., если максимальная суточная сумма осадков выпадает с интенсивностью 1 мм/мин [11–13].

Диаметр бака бассейна-имитатора определяется из условий (6) с учетом выражений (7) и (8), на основе данных о координатах пункта, альбедо водной поверхности, альбедо внутренней поверхности бортика и сведений о суточных суммах прямой солнечной радиации.

Выполнив простейшие преобразования выражения (6), найдем для условий водохранилища взаимосвязь между ошибкой определения испарения для различных месяцев года и долей площади поверхности воды в бассейне-имитаторе, освещенной прямыми солнечными лучами:

$$\eta \geq 1 - L(\Delta E)/S(1 - A) \times (1 - A_z). \tag{18}$$

Наибольшие значения η при одинаковых ошибках испарения (ΔE) приходятся на июнь. Для дальнейших расчетов используется только этот месяц, так как для остальных месяцев требуемое условие выполняется автоматически.

Взаимосвязь между долей площади, освещенной прямыми солнечными лучами (η), и относительным диаметром бака бассейна-имитатора ($2r/Z$) при различных углах высоты солнца (рис. 3) может быть определена из совместного решения выражений (7) и (8).

Для того чтобы, пользуясь комплексным графиком (см. рис. 3), можно было определить относительный диаметр бассейна по заданной погрешности измерения, необходимо установить для широты этого водохранилища минимальный угол высоты солнца, при котором неравенство (6) обеспечивается в большинстве суток. Такая высота угла солнца, равная 10° , была установлена на основе анализа внутрисуточного хода прямой солнечной радиации во все месяцы года.

На основе комплексного графика (см. рис. 3), задаваясь ΔE , были определены соответственные значения $2r/Z$ при фиксированных значениях A_z , равном 10° .

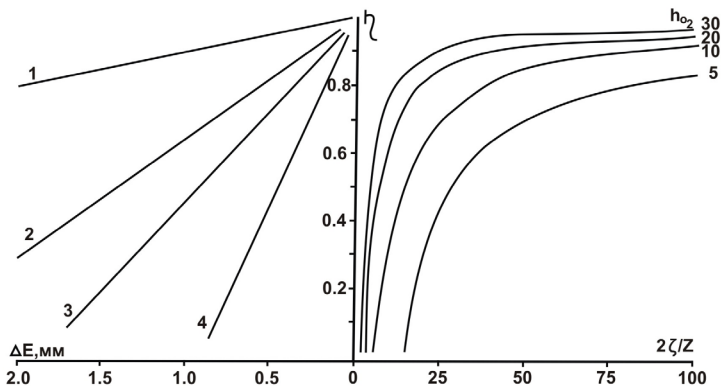


Рис. 3. Комплексный график связи между долей площади, освещенной солнечными лучами (η), ошибкой воспроизведения испарения (ΔE), относительным диаметром бассейна-имитатора ($2r/Z$) при различных высотах солнца (h_0) и альбедо бортика (A_z):

$$1 - A_z = 0; 2 - A_z = 0,7; 3 - A_z = 0,8; 4 - A_z = 0,9$$

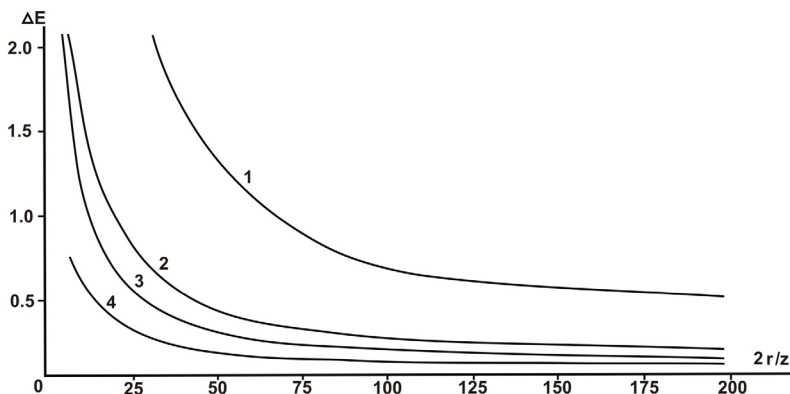


Рис. 4. Зависимость ошибки воспроизведения испарения (ΔE , мм/сут.) от относительного диаметра бассейна-имитатора ($2r/z$) и альбедо его внутреннего бортика (A_2):

$$1 - A_2 = 0; 2 - A_2 = 0,7; 3 - A_2 = 0,8; 4 - A_2 = 0,9$$

Анализ полученной зависимости (рис. 4) показывает, что за счет подбора покрытий, влияющих на альбедо внутренней поверхности бортика, можно существенно влиять на величину относительного диаметра бака бассейна-имитатора.

Расчет глубины бассейна-имитатора произведен на основе формулы (9) с использованием зависимости (14). Путем простейших преобразований формула (9) приведена к более удобному для расчетов виду

$$H \geq \left[\frac{\ln Q_0 (1 - A) - \ln L \Delta E}{1,34 / \sqrt{C}} \right]^2. \quad (19)$$

Оценочные расчеты глубины бассейна-имитатора, выполненные по средним для месяца значениям поглощенной радиации $Q_0(1 - A)$ и относительной глубины прозрачности воды C для фиксированных величин ошибок воспроизведения испарения ΔE , приведены в табл. 4. Из анализа полученных оценок следует, что при любой заданной ошибке наибольшая глубина бассейна необходима в апреле. В этом месяце сочетаются довольно высокие суммы суммарной солнечной радиации с наибольшей (до 9 м) относительной глубиной прозрачности воды.

При фиксированной глубине бассейна, равной 3 м, что не вызывает особых затруднений при реализации, ошибка воспроизведения испарения в апреле и мае не будет превышать 2 мм/сут., в марте и июне – 1,5 мм/сут., в феврале, июле, августе, сентябре и октябре – 1,0 мм/сут., а в январе и декабре – 0,5 мм/сут.

Таблица 4

Оценка глубины бассейна-имитатора при фиксированной ошибке воспроизведения испарения с поверхности водохранилища

Месяц	Глубина (м) при ошибке испарения, не превышающей						
	0,1 мм	0,2 мм	0,3 мм	0,5 мм	1,0 мм	1,5 мм	2,0 мм
Январь	8,7	5,7	4,3	2,7	1,2	0,58	0,29
Февраль	12,0	8,3	6,4	4,4	2,3	1,4	0,85
Март	18,3	12,9	10,2	7,2	4,0	2,5	1,7
Апрель	25,4	18,3	14,7	10,7	6,3	4,2	3,0
Май	21,9	15,9	12,8	9,5	5,7	3,9	2,9
Июнь	16,0	11,6	9,4	6,9	4,2	2,9	2,1
Июль	11,0	8,0	6,4	4,7	2,8	1,9	1,4
Август	8,7	6,2	5,0	3,6	2,1	1,4	1,0
Сентябрь	9,7	6,9	5,4	3,9	2,2	1,4	0,97
Октябрь	9,9	6,8	5,3	3,7	1,9	1,2	0,73
Ноябрь	9,3	6,2	4,7	3,0	1,4	0,73	0,39
Декабрь	8,1	5,2	3,8	2,4	0,95	0,42	0,17

Оценка толщины теплоизоляционного покрытия произведена по выражению (12). Были рассмотрены три варианта теплоизоляционных покрытий: пенобетон, стекловата и пенопласт. Выполненные оценки показывают, что выбор толщины теплоизоляции обусловлен коэффициентом теплопроводности теплоизоляционного материала, диаметром ($2r$) и глубиной (H) бассейна, перепадом температур между водной массой и окружающим почво-грунтом, а также устанавливаемой погрешностью воспроизведения испарения (ΔE). При перепаде температур, равном 10° , и глубине бассейна, равной 3 м, толщина тепловой изоляции составляет от 5 до 25 см при погрешности воспроизведения испарения от 0,1 до 1 мм/сут. и более.

Однако возможен расчет характеристик тепловой изоляции, при условии, что теплообмен между грунтом и контактом с площадью дна и боковой поверхностью испарителя будет меньше или равен эквиваленту (в тепловом выражении) инструментальной погрешности слоя определения испарения, согласно [4, 5].

В соответствии с полученными оценками при погрешности воспроизведения испарения менее 1 мм/сут. высота бортика бассейна должна быть 30 см, его диаметр – 6 м, глубина – около 3 м, толщина тепловой изоляции из пенобетона – 10–15 см, а из пенопласта или стекловаты – около 5 см. Альbedo надводной части внутренней поверхности должно быть около 0,70 (эмаль белая), а подводной части – менее 0,1 (водостойкое покрытие черного цвета). Площадь испаряющей поверхности – 29,6 м²; объем водной массы – 97,7 м³.

С учетом приведенных характеристик была разработана конструкция и на предприятиях химической промышленности изготовлен, собственно, бассейн-имитатор.

Заключение

Выполнено обоснование и разработана методика расчета конструкции бассейна-имитатора для оперативной оценки потерь воды на испарение с конкретного водохранилища. В качестве примера основные элементы испарителя рассчитывались непосредственно для водохранилища наливного типа. Наполнение его происходит в осенне-зимний период, выпуск воды – в весенне-летний при поливах сельскохозяйственных земель. Амплитуда уровня воды достигает 30 м при изменении площади водохранилища в 55,07 км². При этом существенно изменяется альbedo водной поверхности, глубина прозрачности воды и доля проникновения солнечной радиации. Для реализации инструментального метода оперативной оценки испарения с поверхности водохранилища выполнены полевые определения отраженной и поглощенной солнечной радиации, степени прозрачности воды, ее мутности в процессе наполнения и сработки водохранилища. Результаты полевых исследований использованы для разработки методики оценки размеров конструктивных элементов бассейна-имитатора. Произведены расчеты и разработаны исходные зависимости, отражающие взаимосвязь между величиной ошибки воспроизведения испарения бассейном-имитатором, высотой его борта, диаметром, глубиной, а также оптическими характеристиками покрытий надводной и подводной частей бассейна. При погрешности воспроизводства испарения менее 1 мм/сут. определены конструктивные характеристики бассейна-имитатора.

Литература

1. *Урываев В.А.* Экспериментальные гидрологические исследования на Валдае. Л.: Гидрометеоздат, 1953. 232 с.
2. *Кузнецов В.И.* Исследования испарения с водной поверхности // Труды ГГИ. 1969. Вып. 176. С. 127–148.
3. *Константинов А.Р., Федорова Т.Г., Голубев В.С.* Влияние различных факторов на показания водных испарителей, установленных на суше // Труды ГГИ. 1960. Вып. 76. С. 67–111.
4. *Калюжный И.Л., Голубев В.С., Федорова Т.Г.* Теплоизолированный водный испаритель ГГИ-3000ТМ и результаты его испытаний // Труды ГГИ. 1980. Вып. 266. С. 74–85.
5. *Калюжный И.Л., Химин Н.М.* Методы расчета теплоизолированной оболочки водного испарителя // Метеорология и гидрология. 1977. № 8. С. 101–104.

6. *Калюжный И.Л., Решетников Ф.Ю.* Сравнение результатов многолетних наблюдений за испарением с водной поверхности по теплоизолированному испарителю ГГИ-3000ТМ с показанием приборов водно-испарительного комплекса ВФ ГГИ // Труды ГГО. 2020. Вып. 599. С. 59–73.
7. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Л.: Гидрометеоздат, 1976. Вып. 7, ч. 2. 478 с.
8. *Тимофеев М.П.* Метеорологический режим водоемов. Л.: Гидрометеоздат, 1963. 292 с.
9. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 84 с.
10. *Голубев В.С.* Предварительная оценка условий обмена теплом и влагой в испарителях ГГИ-3000 и испарительных бассейнах // Труды ГГИ. 1988. Вып. 331. С. 89–100.
11. *Голубев В.С.* Влияние бортика испарителя на поглощаемую водной массой прямую солнечную радиацию // Труды ГГИ. 1988. Вып. 331. С. 81–88.
12. *Голубев В.С.* Об учете дождевых осадков различными приборами // Труды ГГИ. 1960. Вып. 81. С. 5–17.
13. *Струзер Л.Р., Дьячкова.* О разбрызгивании дождевых капель // Труды ГГО. 1965. Вып. 195. С. 120–132.

ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТООБУСЛОВЛЕННЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПРИХОДНОЙ ЧАСТИ ВОДНОГО БАЛАНСА ВОДОХРАНИЛИЩ АНГАРСКОГО КАСКАДА

А.В. Измайлова, Т.В. Фуксова, К.А. Дубровская,
Л.М. Романова

*ФГБУ «Государственный гидрологический институт»,
Санкт-Петербург*

Под воздействием наблюдающегося в последние десятилетия потепления климата отмечается изменение ледово-термического режима водохранилищ Ангарского каскада и преобразование внутригодового распределения объемов естественных составляющих их водного баланса. Исследование основывается на анализе режимных (годовых и месячных) данных о водных балансах Иркутского, Братского и Усть-Илимского водохранилищ, подготовленных Иркутским управлением Росгидромета и опубликованных в изданиях Государственного водного кадастра. Наряду с составляющими водных балансов рассмотрены изменения характеристик гидрологического режима, напрямую зависящих от климатических факторов: многолетних рядов среднемесячной температуры поверхности воды на постах, расположенных в прибрежной зоне водохранилищ, дат установления ледостава и разрушения ледяного покрова, а также продолжительности периода, свободного ото льда. Анализ изменений составляющих водного баланса и характеристик температурного и ледового режимов водохранилищ выполнен путем сопоставления их средних значений за три примерно одинаковые по продолжительности периода: с 1975 по 1990 г., когда нарушение естественных климатических условий в этом регионе практически не отмечалось; с 1991 по 2005 г., когда были выявлены заметные изменения основных метеорологических характеристик в бассейне озера; и с 2006 по 2020 г. Показано, что на фоне происходящих климатических изменений происходит увеличение доли бокового притока в зимний период ко всем водохранилищам, сокращение периода ледостава и сдвигка половодья на более ранние сроки. Обнаружена тенденция роста осадков в холодное время года и снижение в теплое.

***Ключевые слова:** водный баланс, водохранилища, ледово-термический режим, климатические изменения, внутригодовое распределение стока.*

CHANGES IN THE CLIMATE-DETERMINED COMPONENTS OF THE INCOMING PART OF THE WATER BALANCE OF THE ANGARA CASCADE RESERVOIRS

A.V. Izmailova, T.V. Fuksova, K.A. Dubrovskaya, L.M. Romanova

State Hydrological Institute, St. Petersburg

Under the influence of the climate warming observed in recent decades, there is a change in the ice-thermal regime of the reservoirs of the Angara cascade and a transformation of the intra-annual distribution of the volumes of the natural components of their water balance. The study is based on the analysis of the regime (annual and monthly) water balances of the Irkutsk, Bratsk and Ust-Ilimsk reservoirs, prepared by the Irkutsk Department of Roshydromet and published in the publications of the State Water Cadastre. Along with the components of water balances, the changes in the characteristics of the hydrological regime, which are directly dependent on climatic factors, are considered: long-term series of the average monthly water surface temperature at gauges located in the coastal zone of reservoirs, the dates of ice freeze-up and break-up, as well as the ice-free period duration. The analysis of changes in the components of the water balance and the characteristics of the temperature and ice regimes of reservoirs was carried out by comparing their average values for three periods of approximately the same duration: from 1975 to 1990, when there was practically no disturbance of natural climatic conditions in this region; from 1991 to 2005, when noticeable changes in the main meteorological characteristics in the lake basin were revealed; and from 2006 to 2020. It is shown that against the background of ongoing climate changes, there is an increase in the share of lateral inflow to all reservoirs in winter, a reduction in the freeze-up period, and a shift in flood timing to earlier periods. The trend of precipitation increase in the cold season and decrease in the warm season was found.

Key words: *water balance, reservoirs, ice-thermal regime, climate change, intra-annual runoff distribution.*

Введение

Ангарский каскад представляет собой крупнейший в России комплекс, состоящий из четырех водохранилищ с суммарным объемом воды при НПУ 23 901 км³. Суммарная площадь зеркала водохранилищ – 41 170 км², в том числе первых трех в каскаде – 38 840 км² при объеме воды – 23 843 км³. Строительство ГЭС Ангарского каскада последовательно велось с середины XX в. вниз по течению р. Ангары. Возведение плотины Иркутской ГЭС, верхней в каскаде, было начато в 1950 г. и проводилось до 1958 г., сопровождаясь наполнением Иркутского водохранилища, включающего как речную часть на р. Ангаре, так и оз. Байкал. Уровень озера в результате строительства плотины был поднят в среднем

на 80 см, изменилась внутrigодовая амплитуда его колебаний относительно средних многолетних значений, наблюдаемых в естественных условиях. Плотина второй в каскаде Братской ГЭС была построена в 1961 г., а заполнение самого крупного по объему воды в России Братского водохранилища продолжалось до 1967 г. Строительство плотины третьей в каскаде Усть-Илимской ГЭС было начато в 1963 г., а закончилось в 1980 г. Усть-Илимское водохранилище заполнялось с 1974 по 1977 г. Нижней ступенью в Ангарском каскаде является Богучанская ГЭС, строительство которой продолжалось с 1974 до 2017 г., наполнение водохранилища было начато в 2012 г., проектная отметка водоема достигнута в июне 2015 г.

Каскад Ангарских ГЭС имеет суммарную действующую мощность 12 014,4 МВт и обеспечивает среднегодовую выработку электроэнергии – 66 млрд кВт·ч, или 6 % от общего потребления в стране. Он снабжает электроэнергией потребителей Сибири, в том числе такие крупные предприятия, как Братский алюминиевый завод, Братский и Усть-Илимский лесопромышленные комплексы, «Саянскхимпласт» и др. Громадная роль, которую Ангарский каскад ГЭС играет в экономике Восточной Сибири, вызывает практический интерес к изменениям, происходящим в водном балансе водохранилищ. Прежде всего это обусловлено тем, что гидроэнергетический потенциал зависит от водности потока, который характеризуется высокой межгодовой изменчивостью, обусловленной климатическими факторами. В экстремально маловодные периоды из-за необходимости поддержания мощности ГЭС на требуемом уровне начинают возникать противоречия между различными участниками водохозяйственного комплекса. В то же время, как показала практика последних десятилетий, на фоне климатических изменений риски водохозяйственных систем, связанные с учащением периодов экстремальной водности, усиливаются.

Накопленные к настоящему времени материалы режимных водных балансов трех водохранилищ Ангарского каскада позволяют провести анализ изменений их естественных составляющих, произошедших за последние десятилетия. Режимные водные балансы Богучанского водохранилища не составляются в силу временной ограниченности его эксплуатации (с 2015 г.).

Цель настоящей работы – выявить характер изменений составляющих приходной части водного баланса водохранилищ Ангарского каскада и проанализировать их обусловленность происходящими в регионе глобальными климатическими изменениями.

Материалы и методы оценки

Проведенное исследование основывается на анализе режимных (годовых и месячных) данных о водных балансах Иркутского, Братского и

Усть-Илимского водохранилищ, подготовленных Иркутским управлением Росгидромета и опубликованных в изданиях Государственного водного кадастра [1–3]. Начало составления водного баланса Иркутского водохранилища приходится на 1956 г., Братского – на 1968 г. и Усть-Илимского – на 1975 г. С 1971 г. месячные водные балансы всех водохранилищ составляются по единообразным методикам, базирующимся на результатах многолетних наблюдений на сети озерных постов, прибрежных метеорологических станций и регулярных гидрометеорологических наблюдений на акватории. Для возможности сопоставления материалов по трем водохранилищам каскада в рамках статьи рассматриваются ряды составляющих приходной части их водного баланса за единый период с 1975 по 2020 г. Основное внимание уделено анализу годовых и месячных рядов суммарного и бокового притока к водохранилищам и осадков на их поверхность, как климатообусловленных составляющих приходной части баланса. Данные по испарению с зеркала водохранилищ, также являющемуся климатообусловленной составляющей водного баланса, не рассматриваются в силу того, что на предварительном этапе проверки информации было обнаружено, что ряды испарения характеризуются нестационарностью и наличием значительных выбросов отдельных значений как на месячном, так и на годовом уровне. В отличие от притока и осадков на водное зеркало, которые рассчитываются по результатам прямых гидрологических и метеорологических измерений, величина испарения рассчитывается по эмпирическим формулам в зависимости от метеорологических факторов и температуры поверхности воды, что обуславливает наличие возможных ошибок расчета в отдельные периоды.

Наряду с режимными данными водных балансов для анализа изменений, произошедших с составляющими приходной части водного баланса Ангарских водохранилищ, рассмотрены изменения характеристик гидрологического режима, напрямую зависящих от климатических факторов: многолетних рядов среднемесячной температуры поверхности воды на постах, расположенных в прибрежной зоне водохранилищ, дат установления ледостава и разрушения ледяного покрова, а также продолжительности периода, свободного ото льда. Оценены тренды изменений указанных характеристик.

Анализ изменений составляющих водного баланса и характеристик температурного и ледового режимов водохранилищ выполнен путем сопоставления их средних значений за три примерно одинаковые по продолжительности периода: с 1975 по 1990 г., когда нарушение естественных климатических условий в этом регионе практически не отмечалось; с 1991 по 2005 г., когда большинством авторов [4, 5] отмечались заметные изменения основных метеорологических характеристик в бассейне озера; и с 2006 по 2020 г., когда наблюдалось последнее экстремальное маловодье,

Таблица 1

Сведения о гидрологической изученности водохранилищ (по данным на 2020 г.)

Водохранилище	Характеристика водосбора	Площадь водосбора, км ²	Количество пунктов наблюдений на замыкающих створах притоков	Гидрометрическая изученность бассейнов, %	Количество ОВП на водохранилище	Количество осадкомерных пунктов на побережье
Иркутское, в том числе Байкал	Водосбор р. Ангары до Иркутской ГЭС, включая оз. Байкал	541 770 (540 000)	28 (26)	93,1	26 (в т. ч. 20 на Байкале)	20
Братское	Частный водосбор от Иркутской ГЭС до Братской ГЭС	157 530	13	63,1	10	7
Усть-Илимское	Частный водосбор от Братской ГЭС до Усть-Илимской ГЭС	47 080	3	15	8	8

вызванное значительные водохозяйственные проблемы в Ангарском бассейне. В каждом из выделенных периодов присутствуют как годы с низкой, так и годы с высокой водностью, что позволяет проводить их сопоставление между собой.

Расчет месячных значений составляющих водного баланса выполнен в Иркутском УГМС по материалам гидрометеорологических наблюдений на водохранилищах (табл. 1). На озерных гидрометеорологических постах (ОВП) проводятся наблюдения за уровнем, температурой поверхности воды, ледовыми явлениями. На речных гидрологических постах (ГП) ведутся наблюдения за уровнем и расходами воды.

Суммарный поверхностный приток к створу Иркутского гидроузла рассчитывается с водосборной площади 541 770 км² (включая речную часть Иркутского водохранилища). Поверхностный приток по рекам с изученной части водосбора озера рассчитывается суммированием расходов воды, измеренных в замыкающих гидрометрических створах 28 притоков. До 1973 г. поверхностный приток с неосвоенной гидрометрическими измерениями площади, включая боковой приток в речную часть Иркутского водохранилища, вычислялся с по-

мощью установленных локальных зависимостей стока от средней высоты речных бассейнов по методике Афанасьева [6]. С 1973 г. поверхностный приток с неосвещенной гидрометрическими измерениями площади рассчитывается по средневзвешенным модулям стока рек-аналогов.

Следует отметить, что в разные периоды изменялось количество рек, по данным гидрометрического учета стока которых оценивался измеренный приток в озеро, – от 20 рек до начала 1970-х гг. до 29 рек в 1996 г.

Объем атмосферных осадков на акваторию Байкала определяется по ежемесячным картам изогет, построенным по наблюдениям на береговых и островных осадкомерных пунктах, расположенных на метеостанциях и гидрологических постах, с учетом площади озера 31,5 тыс. км². В разные периоды количество пунктов изменялось: от 29 пунктов с 1960 г. до середины 1970-х гг. до 24–22 в 1980–1990-е гг. В настоящее время карты изогет составляются по данным наблюдений в 20 осадкомерных пунктах. Объем осадков на речную часть Иркутского водохранилища рассчитывается по данным метеостанции Патроны с учетом площади зеркала, соответствующей среднемесячному значению уровня воды.

Основной приток по р. Ангаре в Братское водохранилище принимается по данным ведомственного учета стока через Иркутский гидроузел, в Усть-Илимское – по данным учета стока через Братский гидроузел.

Боковой приток в Братское водохранилище определяется с площади водосбора 163 000 км², включая площадь зеркала водоема, изменяющуюся в зависимости от среднемесячных значений уровня воды, в Усть-Илимское – с площади водосбора 49 000 км², включая изменяющуюся площадь зеркала водоема. Измеренный боковой приток в эти водохранилища учитывается гидрометрическими измерениями на замыкающих гидростворах 13 рек для Братского водохранилища и 3 рек для Усть-Илимского. Боковой приток с неосвещенной измерениями площади водосбора рассчитывается по модулям стока рек-аналогов.

Объем осадков на зеркало Братского водохранилища определяется по данным наблюдений на 7, на зеркало Усть-Илимского – на 8 осадкомерных пунктах, расположенных по периферии водоема, с учетом площади зеркала, соответствующей среднемесячному значению уровня воды.

Результаты исследования

Характер климатических изменений в бассейне р. Ангары. К основным метеорологическим факторам, характеризующим наблюдаемые с начала 1960-х гг. климатические изменения, относят, как правило, температуру и влажность воздуха, осадки, скорость ветра. Общее потепление оказывает влияние на изменения ряда климатических характеристик посредством различных прямых и обратных связей в климатической си-

стеме [7]. В частности, это касается характеристик гидрологического цикла, таких как средние сезонные осадки и показатели экстремальности режима осадков; облачность; характеристики сезонного снежного покрова; речной сток; замерзание и вскрытие водных объектов. Рост содержания водяного пара в атмосфере при повышении температуры потенциально способствует росту осадков, в особенности экстремальных осадков. В среднем по территории России увеличение количества осадков диагностируется на интервале 1976–2020 гг.

Согласно оценкам, выполненным специалистами Климатического центра Росгидромета [7–9], на территории Сибирского федерального округа наблюдается заметное повышение температуры воздуха. В частности, в период с 1960 по 2020 г. средняя годовая температура воздуха в Иркутске возросла примерно на 2,5 °С. Рост температуры отмечался как в теплый, так и в холодный периоды года. Осадки увеличились в основном в холодный период. Однако из-за их малого количества в зимний сезон это существенно не отразилось на изменении годовых сумм.

Темп роста среднегодовой глобальной приповерхностной температуры (суша и море) составляет за период 1976–2020 гг. 0,179 °С за десятилетие, а температуры над сушей – более чем в полтора раза выше – 0,295 °С за десятилетие [7]. Территория России теплеет почти вдвое быстрее: 0,51 °С за десятилетие. Некоторое похолодание наблюдалось между 2005 и 2015 гг. в осенние сезоны. Весной и особенно летом потепление происходит практически монотонно. Наиболее быстрое потепление наблюдается на азиатской территории РФ: 0,71 °С за десятилетие. Потепление наблюдается во все сезоны, однако на сезонные тренды накладываются значительные междесятилетние колебания, особенно выраженные зимой.

Согласно данным [4], на фоне глобальных процессов, сопровождающихся значительным повышением температуры в Арктике, в последние десятилетия происходит изменение климата в бассейне р. Ангары. В работах [10, 11] отмечается повышение летних показателей давления и понижение зимних, сопровождаемые существенным снижением частоты проявлений экстремально низких температур зимой и повышением вероятности проявления экстремально высоких температур летом. Наряду с положительными аномалиями летних температур, способствующими учащению периодов низкой влажности оз. Байкал, в работе [12] отмечается ослабление Юго-Восточного муссона, с чем авторы указанной работы связывают последний маловодный период на р. Селенге.

Как правило, маловодные периоды на оз. Байкал совпадают с маловодными периодами во всем Ангарском каскаде. При этом, как показывает анализ синоптических данных бассейна Иркутского водохранилища, на большей его части (кроме южных районов бассейна р. Селенги) среднегодовые показатели температуры воздуха в последнее 25-летие увеличи-

лись на 1–2 °С по отношению к предыдущему периоду [4]. По данным [13], основное повышение температуры воздуха в бассейне Иркутского водохранилища отмечается в феврале, апреле и ноябре. Наряду с этим на всей территории бассейна происходит снижение годовых сумм осадков. В среднем по водосбору оз. Байкал оно составляет 8,7 мм за десятилетие, а в пределах бассейна р. Селенги – 10,6 мм [13]. Наиболее заметные изменения, выражающиеся в снижении среднесезонных сумм осадков за месяц на 8,2, 12,0 и 6,8 мм, отмечены в июле, августе и сентябре соответственно.

Глобальное изменение климата, выражающееся в пределах Ангарского бассейна в повышении давления и температуры воздуха в летний период и понижении давления и снижении частоты проявлений экстремально низких температур зимой, существенно повлияло на пространственно-временные гидрометеорологические характеристики и привело к внутригодовому перераспределению естественных составляющих водного баланса Ангарских водохранилищ.

Многолетние изменения ледово-термического режима Ангарских водохранилищ. Соответственно климатическим изменениям в бассейне Ангары происходят изменения в ледово-термическом режиме рассматриваемых водохранилищ.

Анализ данных наблюдений за ледовыми явлениями на водохранилищах Ангарского каскада свидетельствует о заметном смещении дат окончания ледостава и очищения ото льда на более ранние сроки и, как следствие, об увеличении на 10–15 дней периода, свободного ото льда. Практически на всех гидрологических постах, расположенных по периметру водохранилищ, даты окончания ледостава и очищения ото льда в третьем рассматриваемом периоде наступают на 7–12 дней раньше, чем в первом. Даты начала ледостава на большинстве постов, расположенных на Братском, Усть-Илимском и на речной части Иркутского водохранилища, значимых изменений не претерпели (рис. 1). Сдвигка на более поздние сроки начала ледостава отмечена лишь на ряде постов, расположенных на оз. Байкал (рис. 2). Причем в районах, где ледостав наступал раньше (в конце декабря–начале января), сдвигка наиболее выражена и достигает недели, тогда как в районах, в которых ледостав наступает позже (в конце первой декады января), сдвигка практически не заметна.

Изменения сроков ледовых явлений связаны с наблюдающимися в регионе изменениями климата, проявляющимися в повышении весенних температур. На оз. Байкал изменения ледового режима выражены наиболее ярко. С ростом весенних температур воздуха происходит повышение среднемесячной температуры воды Ангарских водохранилищ (рис. 3). Анализ многолетних данных свидетельствует о ее увеличении между первым и третьим периодами в апреле месяце на 0,1–0,4 °С (наибольший рост

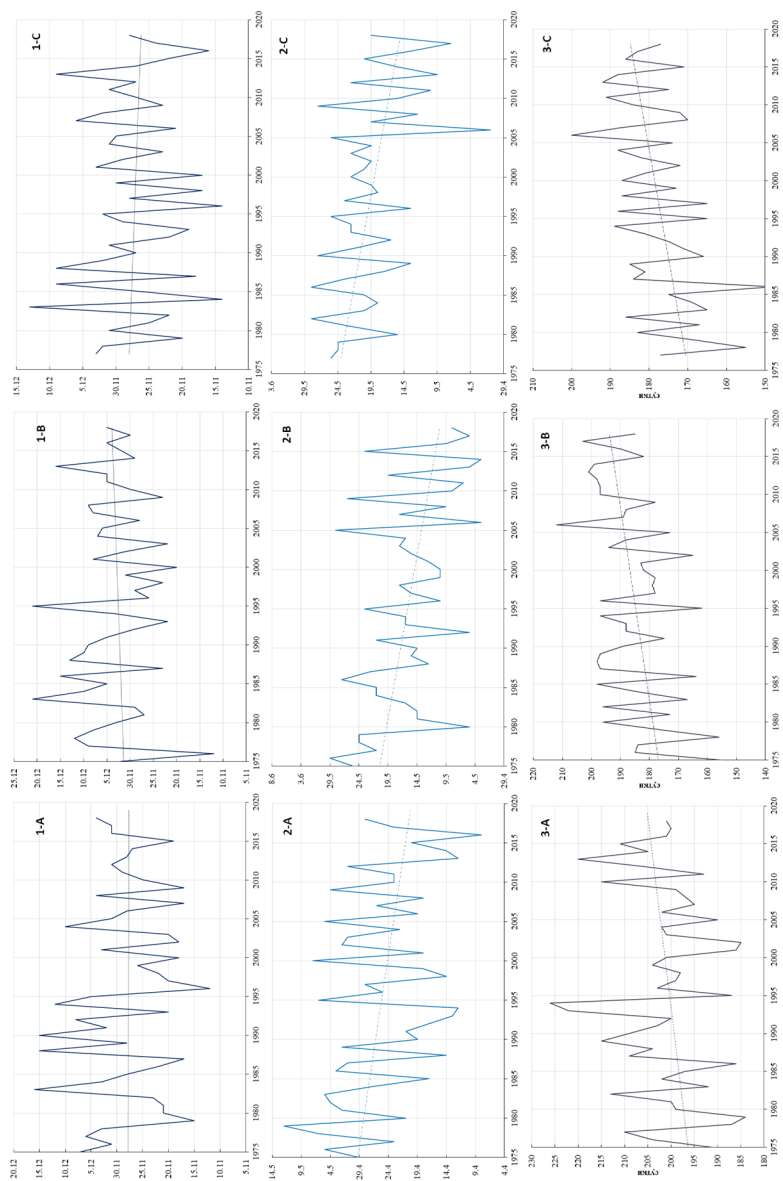


Рис. 1. Многолетние изменения дат начала ледостава (1), очищения ото льда (2) и продолжительность свободного ото льда периода (3) на водохранилищах Ангарского каскада по данным постов, расположенных на ГЭС:

А – Иркутская ГЭС; В – Братская ГЭС; С – Усть-Илимская ГЭС.

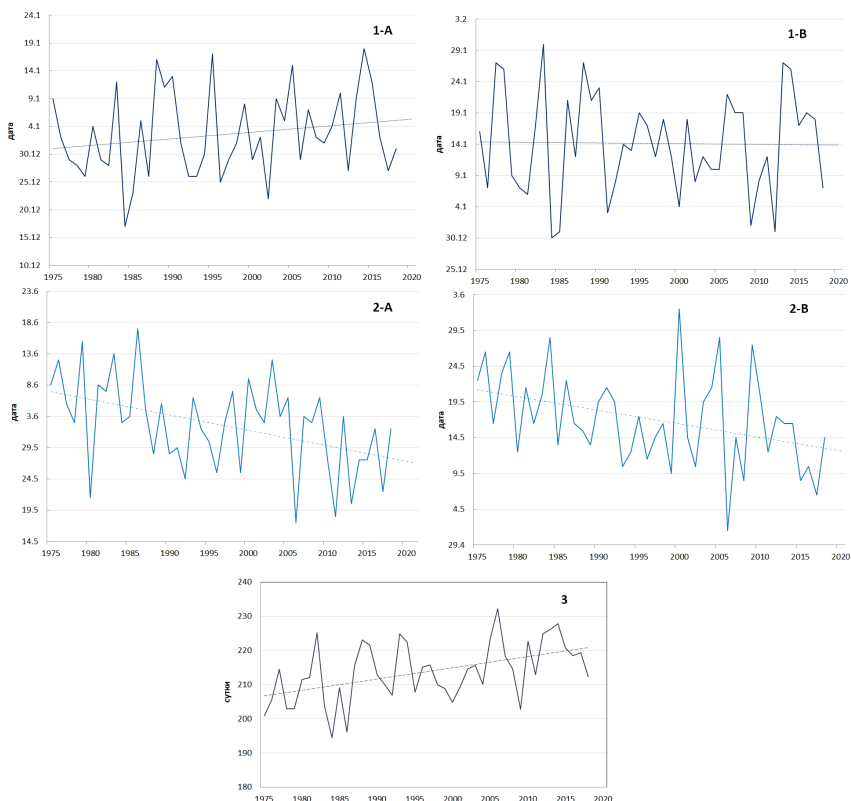


Рис. 2. Многолетние изменения дат начала ледостава (1) и очищения ото льда (2) на оз. Байкал по данным постов Томпа (А) и Танхой (В), продолжительность свободного ото льда периода средняя по всем постам на оз. Байкал (3)

наблюдается на постах на Иркутском водохранилище), а в мае – на 0,7–1,5 °С (наибольший рост на постах на Братском и Усть-Илимском водохранилищах). Несмотря на то, что наиболее заметное повышение температуры воздуха в Ангарском бассейне отмечается в апреле [13], в силу того, что на большей части водохранилищ продолжает стоять лед, увеличение средней температуры воды ярче выражено в мае.

Наблюдающееся в Ангарском бассейне повышение летних показателей давления, сопровождаемое ростом температуры воздуха, приводит к повышению среднемесячных значений температуры воды водохранилищ каскада во все месяцы летнего периода. Анализ многолетних рядов среднемесячной температуры воды свидетельствует о ее заметном росте в летние месяцы на 1–3 °С (рис. 4). На оз. Байкал и на речной части Иркутского

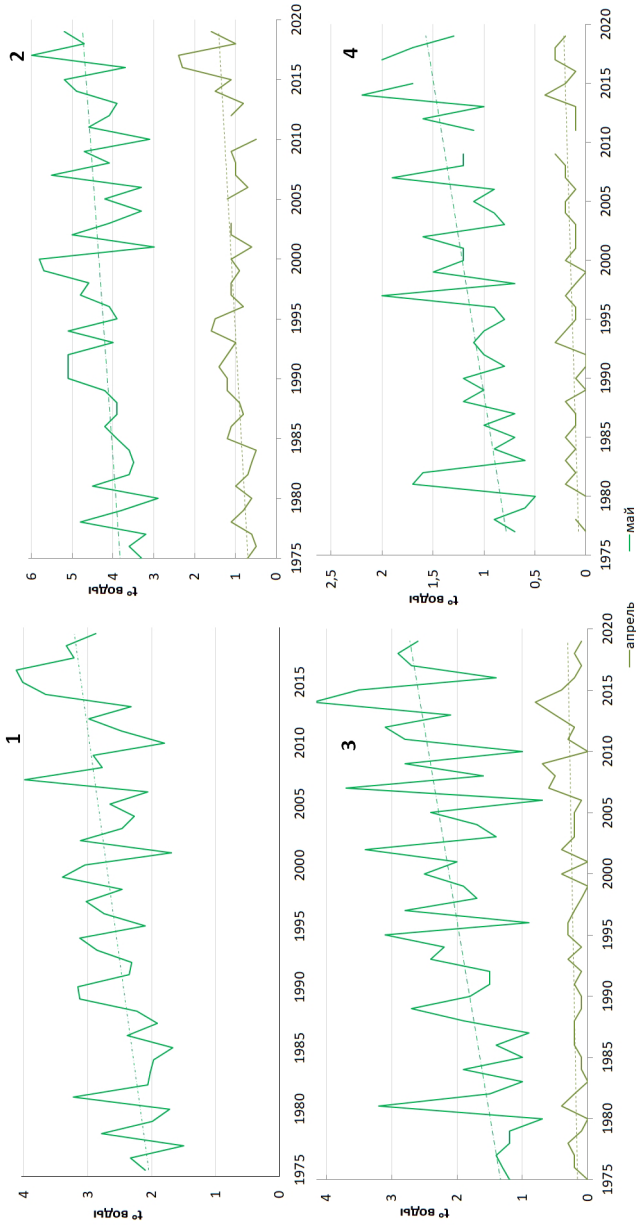


Рис. 3. Многолетние изменения среднемесячной температуры воды в апреле и мае месяцах на оз. Байкал (среднее по озеру) (1) и на постах у ГЭС Иркутского (2), Братского (3) и Усть-Илимского (4) водохранилищ

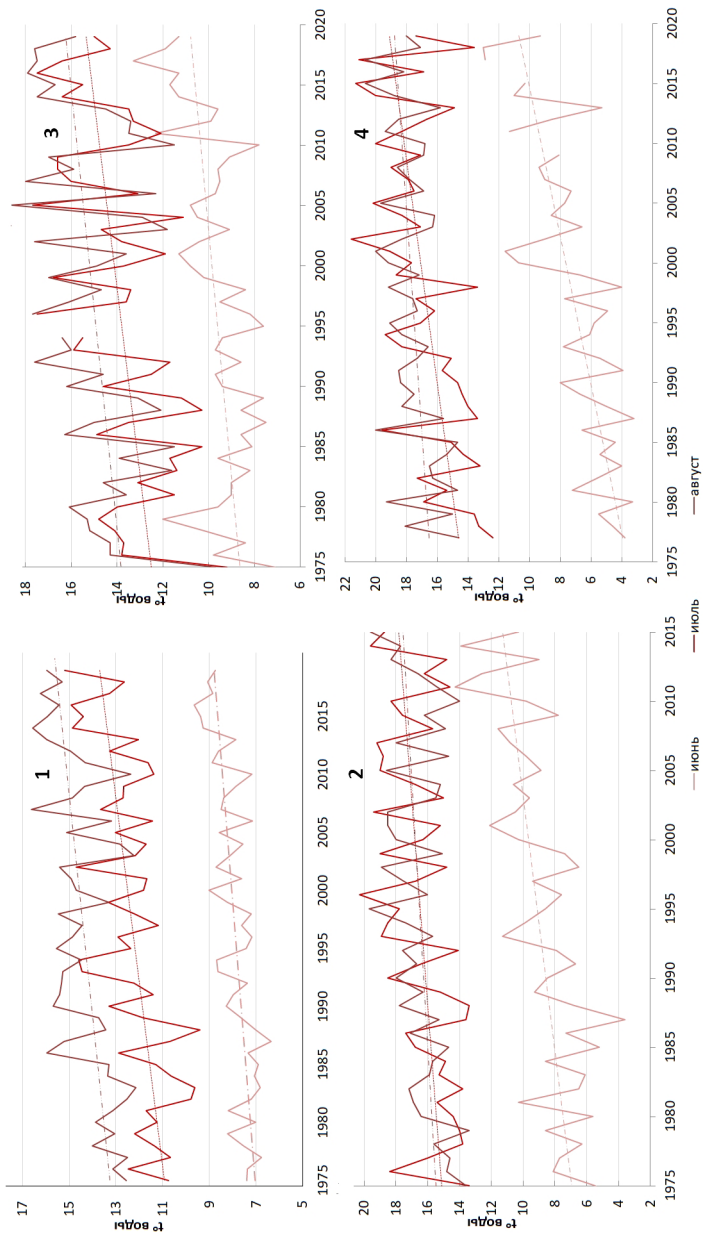


Рис. 4. Многолетние изменения среднемесячной температуры воды в летние месяцы на оз. Байкал (1), на постах у ГЭС Иркутского (2), Братского (3) и Усть-Илимского (4) водохранилищ

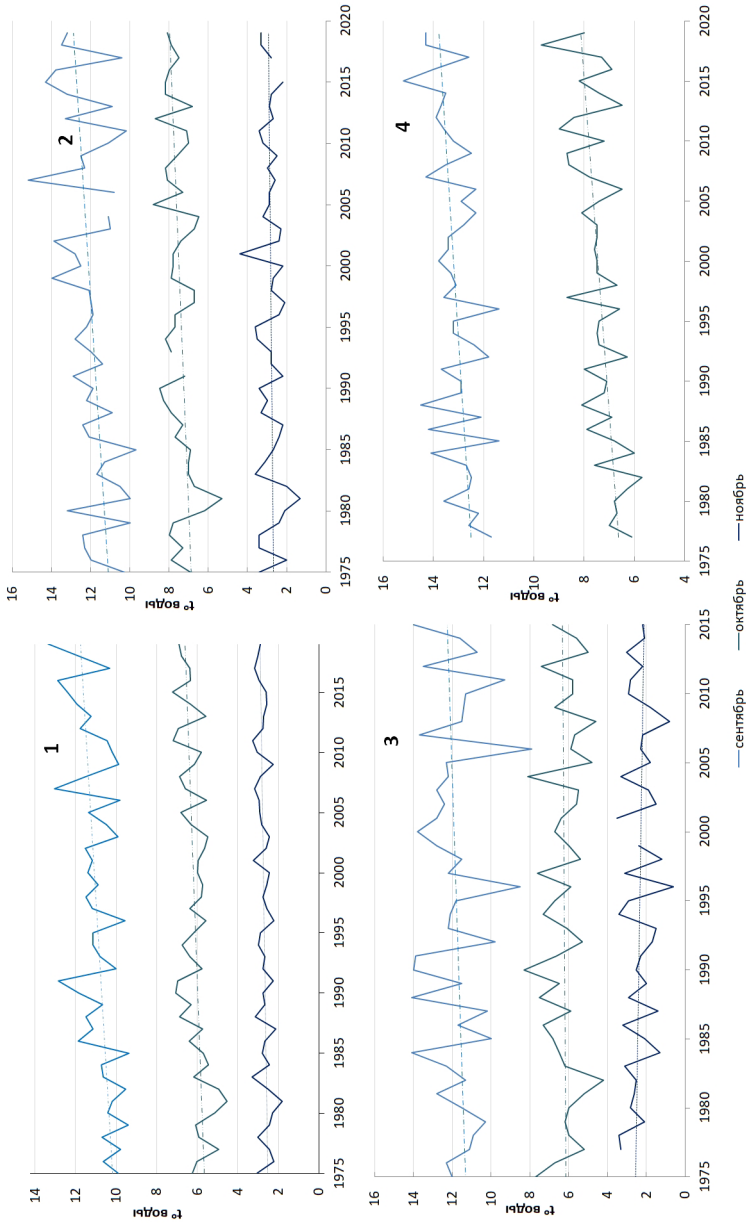


Рис. 5. Многолетние изменения среднемесячных значений температуры воды в осенние месяцы на оз. Байкал (1), на постах у ГЭС Иркутского (2), Братского (3) и Усть-Илимского (4) водохранилищ

водохранилища рост средней июньской температуры воды между первым и третьим периодами составил около $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а июльской и августовской – около $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. На Братском и Усть-Илимском водохранилищах на всех постах прослеживается выраженный рост средней июньской температуры воды (на Братском водохранилище на $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, а на Усть-Илимском – на $5\text{ }^{\circ}\text{C}$), а также существенный рост средней температуры июля месяца (на 2 и $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно), тогда как рост температуры в августе (около $1\text{ }^{\circ}\text{C}$) выражен не столь сильно.

Анализ многолетних рядов среднемесячной температуры воды Ангарских водохранилищ в осенний период свидетельствует о ее незначительных изменениях (рис. 5), более выраженных лишь в сентябре (увеличение средних температур в последнем периоде на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ на Иркутском водохранилище, на $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ – на Братском и Усть-Илимском).

Климатические изменения притока к водохранилищам и осадков на их поверхность. Период с 1975 по 2020 г. характеризовался последовательной сменой маловодных и многоводных фаз. На рис. 6 представлены многолетние изменения суммарного притока к водохранилищам Ангарского каскада и разностные интегральные кривые. На начало рассматриваемого периода приходится экстремальное маловодье, продолжавшееся до весны 1982 г., когда уровень Байкала опустился до отметки 455,27 м ТО, т. е. ниже проектного уровня мертвого объема (455,54 м ТО), а уровень Братского водохранилища приблизился к уровню мертвого объема (392 м ТО). С мая 1982 г. уровень воды в верховье р. Ангары начал резко расти. Как видно из характера интегральных кривых (см. рис. 6), период с 1983 по 1995 г. можно охарактеризовать как многоводный, когда приток воды в водохранилища практически ежегодно был выше нормы, рассчитанной для периода совместного функционирования трех Ангарских ГЭС.

Максимальный годовой приток в Иркутское водохранилище наблюдался в 1988 г. и составлял 85 000 млн м^3 , в Братское – в 1985 г. (114 000 млн м^3), в Усть-Илимское – в 1995 г. (125 000 млн м^3). С 1996 года приток воды в водохранилища сократился и вплоть до 2013 г. колебался около нормы в пределах 10 % от среднемноголетних значений, лишь в отдельные годы опускаясь ниже. В 2014 г. летний приток в водохранилища оказался существенно ниже нормы, и период с 2014 по 2017 г. считается экстремально маловодным, настолько, что с октября 2014 г. для предотвращения снижения уровня оз. Байкал ниже законодательно допустимого уровня расходы через Иркутскую ГЭС были сокращены до предельно допустимых минимальных значений – 1300 $\text{м}^3/\text{с}$. За рассматриваемый 46-летний период функционирования трех Ангарских ГЭС минимальные значения годового притока в Иркутское водохранилище приходится на 2015 г. (42 610 млн м^3), а в Братское – на 2017 г. (63 380 млн м^3). Минимальный приток в Усть-Илимское водохранилище в период последнего

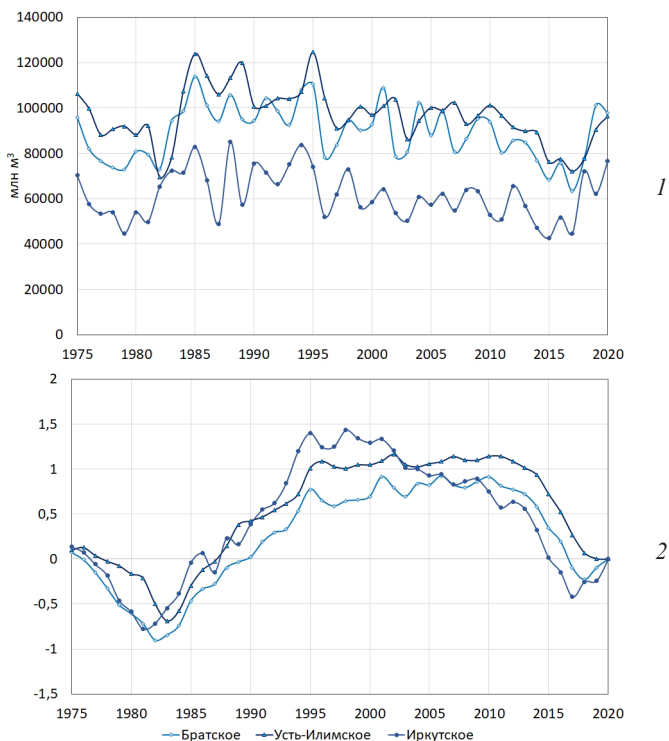


Рис. 6. Многолетние изменения суммарного притока к водохранилищам Ангарского каскада (1) и разностные интегральные кривые (2)

маловодья в 2017 г. составил 72 158 млн м³, его более низкие значения отмечались лишь в 1982 г. (69 550 млн м³). С мая 2018 г. уровень воды в верховье р. Ангары начал быстро расти, так что период с 2018 г. можно охарактеризовать как период повышенной водности.

В связи с тем, что приток воды по р. Ангаре обеспечивает 63 % суммарного притока в Братское водохранилище и 93 % в Усть-Илимское, периоды водности для всего каскада в целом совпадают с соответствующими периодами на оз. Байкал. Различия наблюдаются лишь в короткие периоды и чаще всего объясняются асинхронностью бокового притока к разным водохранилищам. Коэффициент корреляции рядов суммарного годового притока в Иркутское и Братское водохранилища составляет 0,74, а в Братское и Усть-Илимское – 0,72. В то же время коэффициент корреляции рядов годового бокового притока в Братское и Усть-Илимское низкий – 0,32.

Сопоставление осредненных значений суммарного притока в Ангарские водохранилища за три рассматриваемых периода (табл. 2) показыва-

Таблица 2

Средние значения годового притока к Ангарским водохранилищам, млн м³ (числитель) и коэффициент вариации (знаменатель) за отдельные периоды совместного функционирования Ангарских ГЭС

Период	Иркутское	Братское	Усть-Илимское
Общий приток			
1975–2020	<u>61 645</u> 17,7	<u>89 162</u> 13,7	<u>96 856</u> 12,8
1975–1990	<u>63 137</u> 19,6	<u>89 481</u> 14,2	<u>99 411</u> 15,1
1991–2005	<u>63 882</u> 15,4	<u>94 120</u> 11,8	<u>100 959</u> 8,6
2006–2020	<u>57 818</u> 17,0	<u>84 443</u> 13,4	<u>89 994</u> 10,8
Макс.	84 954 (1988)	114 000 (1985)	124 570 (1995)
Мин.	42 608 (2015)	63 380 (2017)	69 550 (1982)
Боковой приток			
1975–2020		<u>33 493</u> 17,1	<u>6914</u> 22,9
1975–1990		<u>33 159</u> 14,3	<u>7678</u> 21,4
1991–2005		<u>33 943</u> 18,9	<u>6628</u> 16,7
2006–2020		<u>33 399</u> 18,8	<u>6384</u> 26,5
Макс.		46 450 (2001)	11 260 (1983)
Мин.		22 370 (2017)	3988 (2017)

ет, что его наименьшие значения приходятся на последний пятнадцатилетний период, включающий экстремальное маловодье 2014–2017 гг. Среднее за последний период значение суммарного притока в Иркутское и Братское водохранилища составило 94 % нормы, в Усть-Илимское – 93 %. Обращает на себя внимание, что осредненное за последний период значение бокового притока в Братское водохранилище было близко к норме, а в Усть-Илимское составило 92 % нормы (Иркутское водохранилище, включающее акваторию оз. Байкал, – верхнее в каскаде, поэтому к нему рассматривается только общий приток). Наибольшие значения суммарного притока наблюдались в среднем периоде 1991–2005 гг., характеризовавшемся отсутствием выраженного маловодья. На этот период приходятся и наиболее

высокие значения бокового притока в Братское водохранилище. Боковой приток в Усть-Илимское водохранилище постепенно сокращался на протяжении всего времени его существования, его осредненное за последний период значение в 1,2 раза ниже, чем за первый. За период 1975–2020 гг. выявлен значимый нисходящий тренд как бокового, так и суммарного притока к Усть-Илимскому водохранилищу.

Сопоставление коэффициентов вариации годовых значений общего притока в водохранилища за рассмотренные периоды свидетельствует, что его наибольшие значения были в первом периоде, наименьшие – во втором. Коэффициент вариации годовых значений бокового притока к Братскому и Усть-Илимскому водохранилищам в последние десятилетия повысился.

Анализ многолетних изменений приходных составляющих водного баланса Ангарских водохранилищ не показал значимых трендов годового притока к Иркутскому и Братскому водохранилищам и выявил нисходящий тренд годового притока к Усть-Илимскому водохранилищу. Более существенные изменения коснулись внутригодового распределения притока к указанным водохранилищам.

На рис. 7 представлены изменения среднемесячных значений суммарного и бокового притока к Ангарским водохранилищам за рассматриваемый период.

Как видно из рис. 7, происходит приращение доли бокового притока в холодный период года к Ангарским водохранилищам относительно годового объема. Доля притока за ноябрь–март к Иркутскому водохранилищу (рис. 8) выросла на 1,9 % (в 1975–1990 гг. она в среднем составляла 9,7 %, в 1991–2005 и 2006–2020 гг. – около 11,6 %). Тенденция увеличения зимнего притока четко проявляется и при рассмотрении рядов притока за весь период функционирования Иркутской ГЭС, т. е. с 1956 г. по настоящее время [5]. При рассмотрении рядов месячного притока к Иркутскому водохранилищу выявлены значимые восходящие тренды рядов притока с ноября по март.

Доля бокового притока в холодную часть года к Братскому водохранилищу с 1975 г. выросла на 1,7 %, к Усть-Илимскому – на 1,9 %. Ее основное повышение произошло между первым и вторым рассматриваемыми периодами. При этом приращение доли суммарного притока в холодную часть года к Братскому и Усть-Илимскому водохранилищам не наблюдается, что связано с характером регулирования стока на ГЭС в холодное время года, а именно снижением зимних попусков на Иркутском и Братском ГУ в последние десятилетия (рис. 9). Как уже указывалось выше, приток по Ангаре составляет основной объем притока к обоим водохранилищам. За счет его регулирования на гидроузлах отмеченная для бокового притока тенденция роста в холодную часть года при рассмотрении суммарного притока незаметна (см. рис. 7). Напротив, наблюдается его

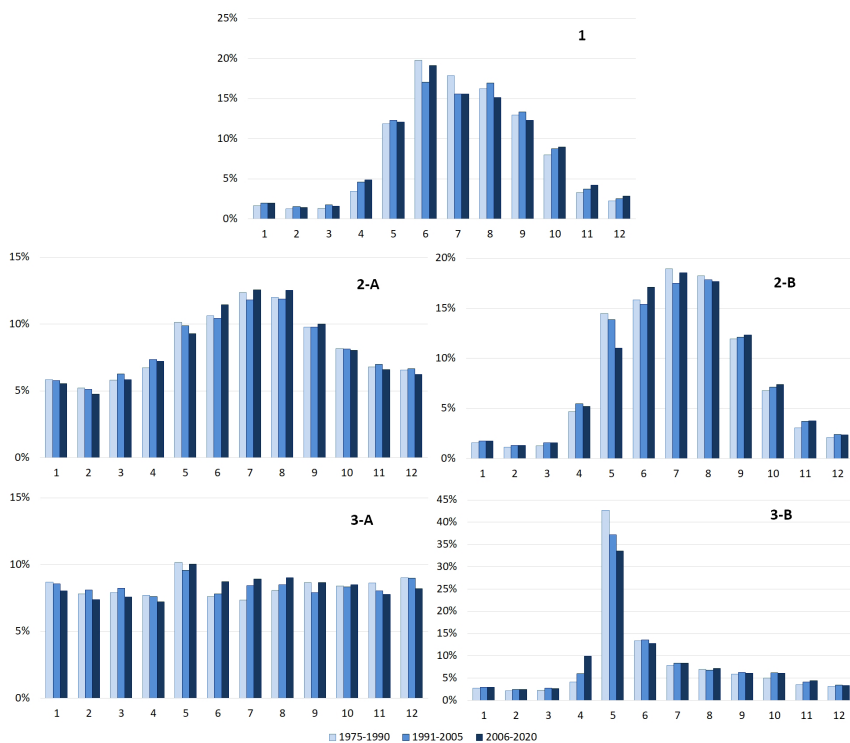


Рис. 7. Внутригодовое распределение притока к Ангарским водохранилищам в % от годового:

1 – Иркутское; 2 – Братское; 3 – Усть-Илимское; А – суммарный приток; В – боковой приток

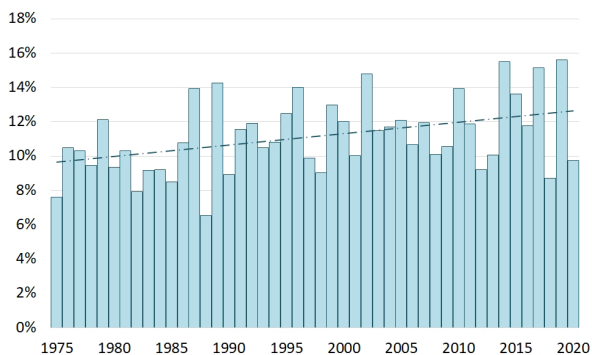


Рис. 8. Доля зимнего притока к Иркутскому водохранилищу в процентах от годового

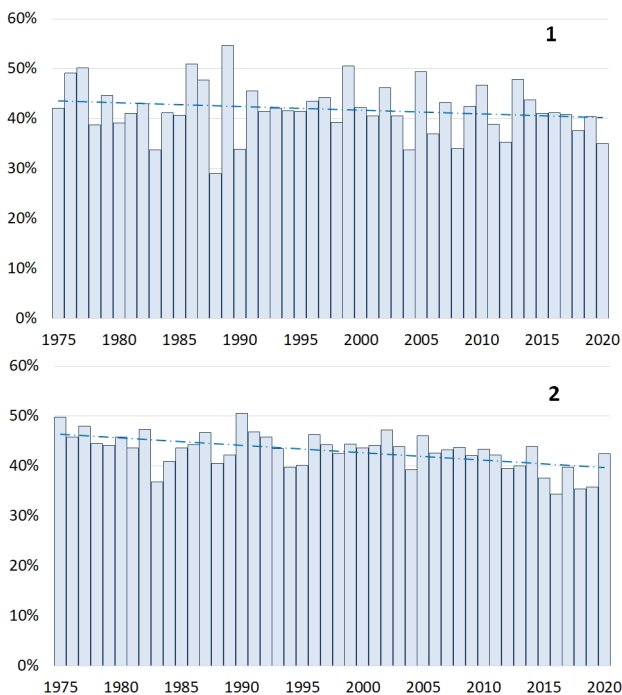


Рис. 9. Доля стока через ГУ Иркутского (1) и Братского (2) водохранилищ за ноябрь–март месяцы в процентах от годового

снижение, так как сокращение зимних попусков превосходит наметившуюся тенденцию повышения зимнего стока в естественных условиях.

На фоне повышения среднемесячных температур воздуха и воды в рассматриваемом бассейне для всех Ангарских водохранилищ за период 1975–2020 гг. фиксируется тенденция сдвижки половодья на более ранние сроки. Доля притока в апреле к Иркутскому водохранилищу в третьем периоде увеличилась на 1,4 %, бокового и основного притока к Братскому – на 0,5 %, к Усть-Илимскому – на 5,8 % (рис. 10). При этом к Усть-Илимскому водохранилищу существенно снизился приток в мае месяце (около 9 %).

Чаще всего годы высокой водности на Ангаре определяются повышенным половодьем и высоким паводковым стоком в летние и осенние месяцы. Коэффициенты корреляции между значениями месячного и годового притока возрастают к лету и постепенно снижаются с начала осени (табл. 3). Годовой приток в Иркутское водохранилище прежде всего определяется притоком за июль–октябрь. Суммарный годовой приток в Братское и Усть-Илимское водохранилища связан с режимом попусков на

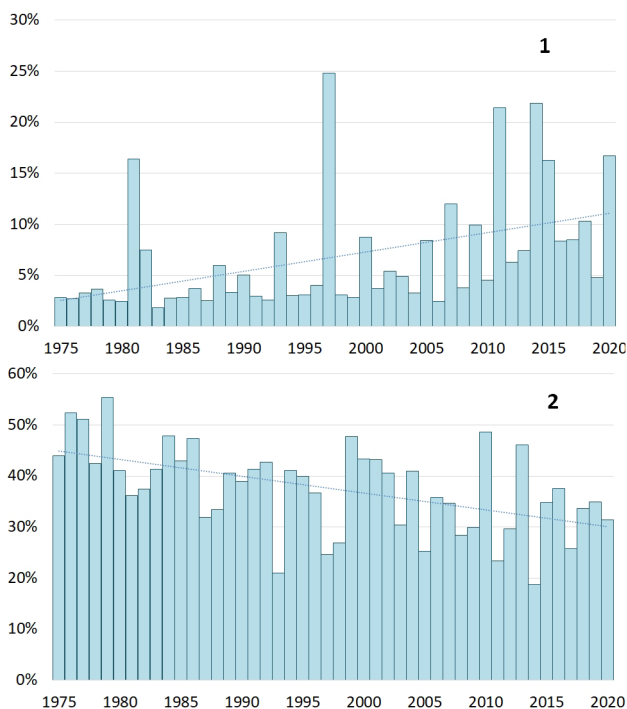


Рис. 10. Доля бокового притока к Усть-Илимскому водохранилищу за апрель (1) и май (2) месяцы в процентах от годового

Иркутском и Братском гидроузлах. При этом боковой приток в Братское водохранилище (37 % суммарного притока) определяется притоком во вторую часть года, а в Усть-Илимское (лишь 7 % суммарного притока) – притоком за май и июнь месяцы.

За весь рассматриваемый период четко прослеживается тенденция снижения притока в Иркутское водохранилище в летние месяцы (рис. 11). Доля суммарного притока в водохранилище за июнь–август снизилась на

Таблица 3

Коэффициенты корреляции между месячными и годовым значениями бокового притока к Ангарским водохранилищам

Водохранилище	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Иркутское	0,25	0,31	0,27	0,18	0,24	0,51	0,77	0,80	0,81	0,80	0,66	0,65
Братское	0,15	0,19	0,06	0,16	0,59	0,66	0,72	0,60	0,59	0,65	0,67	0,66
Усть-Илимское	0,47	0,49	0,29	0,02	0,83	0,76	0,62	0,55	0,61	0,57	0,60	0,69

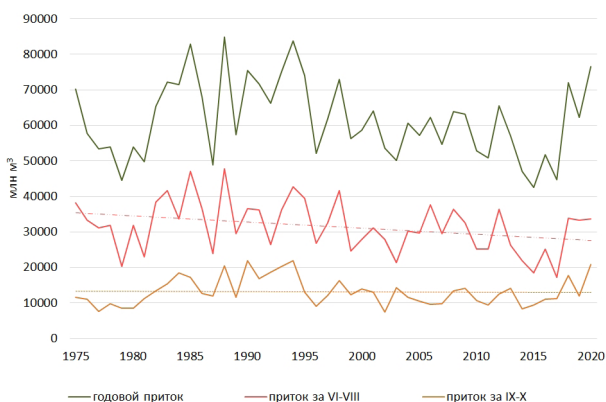


Рис. 11. Многолетняя динамика притока к Иркутскому водохранилищу в летние и осенние месяцы в сравнении с годовым притоком (в млн м³)

4 % (с 54 % в первую часть периода до 50 % в третью). При этом изменений доли летнего притока в Братское и Усть-Илимское водохранилища не произошло. Доля суммарного притока в летние месяцы в Усть-Илимское водохранилище даже немного выросла (с 23 до 26 %) за счет увеличения летних попусков через Братскую ГЭС. Тенденция снижения доли летнего притока в Иркутское водохранилище определяется происходящими в Ангарском бассейне изменениями климата, динамикой повышения летних показателей давления (антициклональная циркуляция), сопровождаемых ростом температур.

В последнем рассматриваемом периоде, когда внутригодовое перераспределение притока в водохранилища Ангары стало наиболее выражено, годы повышенной водности совпадали с повышенными значениями как летнего, так и осеннего стока. На примере Иркутского водохранилища (см. рис. 11) можно заметить, что если в первом периоде характер колебаний годового притока повторял характер колебаний летнего притока, то в последнем периоде усилилась его зависимость от притока за сентябрь и октябрь месяцы. При этом коэффициент корреляции между суммарным летним и годовым притоком в водохранилище последовательно снижался с 0,93 в первом периоде до 0,87 в третьем.

Анализ изменений внутригодового распределения осадков (рис. 12), выпадающих на зеркало водохранилищ Ангарского каскада, также свидетельствует о тенденции их роста в холодное время года (доля осадков, выпадающих с ноября по март, выросла на 2–4 %) и снижения в середине лета. В то же время при рассмотрении осадков за каждый отдельный месяц значимый восходящий тренд выявлен лишь для осадков за март, выпадающих на зеркало Братского водохранилища. Как показано на рис. 13,

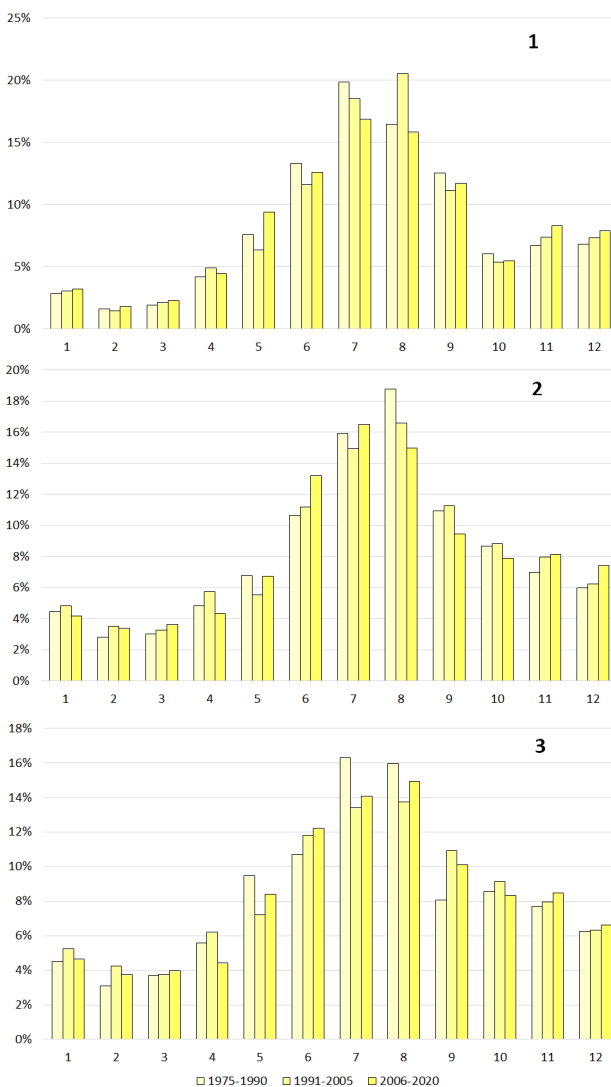


Рис. 12. Внутригодовое распределение осадков, выпадающих на поверхность Ангарских водохранилищ в % от годового:

1 – Иркутское; 2 – Братское; 3 – Усть-Илимское

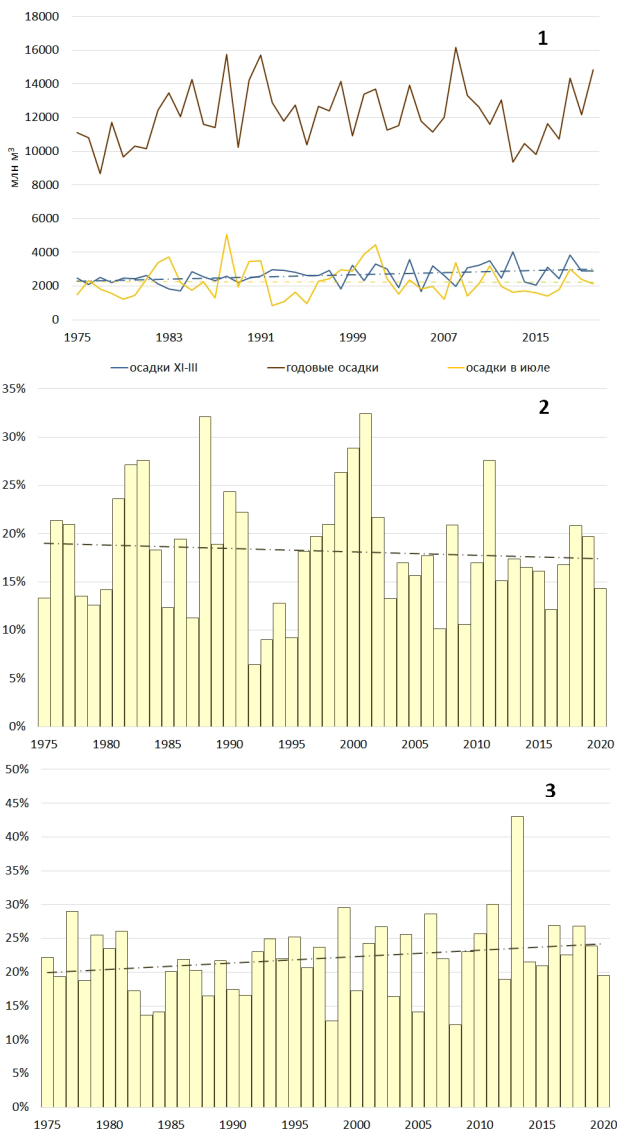


Рис. 13. Многолетняя динамика выпадения осадков на зеркало Иркутского водохранилища в млн м³ (1) и доля осадков за июль (2) и суммарных осадков за ноябрь–март (3) месяцы в процентах от годового

наблюдается тенденция снижения осадков в середине лета на зеркало Иркутского водохранилища, где в июле месяце их доля сократилась на 2 %, тогда как доля осадков за холодное время года выросла на 4 %.

Тренды годовых сумм осадков на зеркало Братского и Усть-Илимского водохранилищ не выявлены, изменения коснулись лишь перераспределения осадков внутри года.

Характер распределения осадков внутри года для всех Ангарских водохранилищ схожий и характеризуется их максимумом в течение лета и небольшими значениями в холодный период. Происходящие изменения приводят к большей выравненности выпадения осадков в течение года. Коэффициент вариации осредненных месячных значений осадков на зеркало Иркутского водохранилища за три периода снизился с 0,71 до 0,61, Братского – с 0,60 до 0,54, Усть-Илимского – с 0,52 до 0,47. В то же время корреляция между годовыми значениями осадков, выпадающих на зеркало трех водохранилищ, отсутствует (коэффициенты составляют 0,12–0,34). Она существенно ниже, чем корреляция между годовыми значениями бокового притока к каждому водохранилищу и осадками на его поверхность (0,26–0,48).

Заключение

Проведенный анализ режимных водных балансов Иркутского, Братского и Усть-Илимского водохранилищ за период их совместного функционирования показал, что изменения естественных составляющих водного баланса водохранилищ согласуются с характером изменений климата, наблюдающихся в Ангарском бассейне. Годовые величины притока к большинству водохранилищ не претерпели сильных изменений, отмечен лишь значимый нисходящий тренд суммарного годового притока к Усть-Илимскому водохранилищу. В то же время выявлено внутригодовое перераспределение естественных составляющих приходной части водного баланса.

На фоне понижения зимних показателей давления, приводящих к смягчению зим, в холодный период года наблюдается увеличение доли бокового притока ко всем водохранилищам. Доля притока за ноябрь–март к Иркутскому водохранилищу выросла на 1,9 %, доля бокового притока к Братскому водохранилищу – на 1,7 %, к Усть-Илимскому – на 1,9 %. На фоне снижения зимних попусков через Иркутский гидроузел с октября по январь и через Братский гидроузел с октября по апрель повышение суммарного притока к Братскому и Усть-Илимскому водохранилищам не выявлено.

На фоне роста температуры воздуха, наиболее выраженного в апреле месяце, для всех Ангарских водохранилищ отмечается сокращение периода ледостава и тенденция сдвиги половодья на более ранние сроки.

Доля притока в апреле к Иркутскому водохранилищу увеличилась на 1,4 %, бокового и основного притока к Братскому – на 0,5 %, к Усть-Илимскому – на 5,8 %. При этом к Усть-Илимскому водохранилищу существенно снизился суммарный приток в мае месяце (около 9 %).

На фоне повышения летних показателей давления, сопровождаемых ростом температуры воздуха и воды, четко прослеживается тенденция снижения притока в Иркутское водохранилище в летние месяцы. Доля суммарного притока в водохранилище за июнь–август в годовом его объеме снизилась на 4 %. При этом изменений доли летнего притока в Братское и Усть-Илимское водохранилища не выявлено. Доля притока в сентябре–октябре месяцах во все водохранилища каскада значимых изменений не претерпела.

Отмечено, что если в первом периоде совместной работы Ангарских ГЭС, 1975–1991 гг., характер колебаний годового притока в Иркутское водохранилище повторял характер колебаний летнего притока, то в последнем периоде, 2006–2021 гг., усилилась его зависимость от притока за сентябрь и октябрь месяцы. Коэффициент корреляции между суммарным летним и годовым притоком в водохранилище последовательно снижался с 0,93 в первом периоде до 0,87 в третьем.

Анализ изменений внутригодового распределения осадков, выпадающих на зеркало водохранилищ Ангарского каскада, свидетельствует о тенденции их роста в холодное время года (доля осадков, выпадающих с ноября по март, выросла на 2–4 %) и снижения в теплое время года, что согласуется с наблюдающимся в Ангарском бассейне изменением циркуляции атмосферы в разные сезоны года.

Литература

1. Материалы наблюдений на озерах и водохранилищах (Дополнения к гидрологическим ежегодникам, Т. 7, вып. 2–4), 1956–1959 гг.
2. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 7. Бассейн Карского моря (восточная часть), вып. 2–4. Бассейн Ангары). М.: Гидрометеоиздат, 1960–1980 гг.
3. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1, вып. 13–15. Бассейн р. Ангары, оз. Байкал и р. Лены (верхнее течение). Ч. 2. Озера и водохранилища. Иркутск: Иркутское УГМС, 1981–2020 гг.
4. Никитин В.М., Абасов Н.В., Бережных Т.В., Осипчук Е.Н. Ангаро-Енисейский каскад ГЭС в условиях изменяющегося климата // Энергетика и климат. 2017. Вып. 62 (4). С. 62–70.
5. Никитин В.М., Абасов Н.В., Осипчук Е.Н., Бережных Т.В., Георгиевский В.Ю., Измайлова А.В., Молчанова Т.Г., Фуксова Т.В. Уровненный режим озера Байкал // География и природ. ресурсы. 2022. № 5. С. 36–44.

6. *Афанасьев А.Н.* Водный баланс озера Байкал // Тр. Байкальской Лимнологической станции. 1960. Т. 18. С. 155–241.
7. Третий оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: «Научно-емкие технологии», 2022. 124 с.
8. *Школьник И.М., Агентьева Е.М., Клюева М.В., Стадник В.В., Хлебникова Е.И., Фасолько Д.В., Разова Е.Н., Рудакова Ю.Л., Павлова В.Н.* Федеральные округа России: изменения климата и экономика // Тр. ГГО. 2022. Вып. 604. С. 55–201.
9. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М.: Росгидромет, 2014. 30 с.
10. *Абасов Н.В., Бережных Т.В., Ветрова В.В.* Исследование влияния Арктики на гидроэнергетический потенциал Ангарского каскада ГЭС // Тр. Британско-российской конференции «Гидрологические последствия изменения климата». Барнаул: Пять плюс, 2009. С. 42–49.
11. *Shkorba S., Ponomarev P., Dmitrieva E.* Linkages of climatic anomalies in Arctic, Asian Pacific and Indo-Pacific regions // Proceedings of Joint Science and Education Conference: Arctic Dialogue in the Global World. Ulan-Ude: Buryat State University Publishing Department, 2015. P. 122–125.
12. *Бережных Т.В., Марченко О.Ю., Абасов Н.В., Мордвинов В.И.* Изменение летней циркуляции атмосферы над Восточной Азией и формирование длительных маловодных периодов в бассейне реки Селенги // География и природ. ресурсы. 2012. № 3. С. 61–68.
13. *Сутырина Е.Н.* Современные тенденции изменения климатических условий в пределах водосбора оз. Байкал // Вестн. Забайкал. гос. ун-та. 2019. Т. 25, № 5. С. 49–55.

КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ РАСХОДОВ ВОДЫ НА ОСНОВЕ РАСЧЕТА ДИНАМИЧЕСКИХ РУСЛОВЫХ ВОДНЫХ БАЛАНСОВ

Т.И. Яковлева

*ФГБУ «Государственный гидрологический институт»,
Санкт-Петербург*

В статье рассматривается метод краткосрочного прогноза расходов воды в замыкающем створе участка на основе расчета динамических (краткосрочных) русловых водных балансов. Известно, что расчет и анализ русловых водных балансов для участков рек является одним из наиболее эффективных методов контроля учета речного стока. На примере участков рек Обь от г. Барнаула до г. Камня-на-Оби и Амур от г. Хабаровска до г. Комсомольска-на-Амуре в статье показано, что метод расчета краткосрочных русловых водных балансов с учетом времени добегания и параметров трансформации паводочной волны на расчетном участке может быть успешно использован для краткосрочного прогнозирования расходов воды в замыкающем створе участка с заблаговременностью от 1 до 3 суток.

***Ключевые слова:** расход воды, русловые водные балансы, русловое регулирование, трансформация паводочной волны.*

SHORT-TERM FORECAST OF WATER DISCHARGE BASED ON THE CALCULATION OF DYNAMIC CHANNEL WATER BALANCES

T.I. Yakovleva

State Hydrological Institute, St. Petersburg

The article discusses the method of short-term forecasting of water discharges in the outlet section of the site based on the calculation of dynamic (short-term) channel water balances. It is known that the calculation and analysis of channel water balances for river sections is one of the most effective methods for monitoring the accounting of river runoff. On the example of sections of the Ob river from the city of Barnaul to the city of Kamen-on-Ob and the Amur river from Khabarovsk to Komsomolsk-on-Amur, the article shows that the method of calculating short-term channel water balances, taking into account the travel time and parameters of

flood wave transformation in the calculated section, can be successfully used for short-term forecasting of water flow in the outlet section with a lead time of 1 to 3 days.

Key words: *water discharge, channel water balances, channel storage, flood wave transformation.*

Введение

Методы балансов широко используются в практике гидрологических расчетов и прогнозов при изучении закономерностей формирования речного стока и преобразований его режима под влиянием климата и антропогенных воздействий. Речной сток рассматривается, прежде всего, как один из видов природных водных ресурсов. Контроль надежности учета речного стока и его использования осуществляется на основе анализа русловых водных балансов (РВБ), как соотношения потерь и приращений стока по длине реки.

Русловые водные балансы составляются для выделенных участков рек и являются инструментом для изучения условий формирования речного стока, выделения его отдельных генетических составляющих; а также оценки надежности учета стока в гидрометрических створах, ограничивающих расчетный участок. РВБ позволяют проанализировать и понять механизм перемещения и трансформации волн паводков и половодий при их продвижении по руслам и поймам рек в пределах фиксированных участков [1, 2].

Русловые водные балансы выражают соотношение между поступлением воды на участок реки (канала) через верхний ограничивающий створ и стоком в нижнем, замыкающем створе с учетом притока, изъятий, потерь и сбросов воды между ними [1]. В зависимости от характера решаемых задач могут быть использованы различные уравнения РВБ. Общая структура РВБ зависит как от климатических условий, факторов подстилающей поверхности (ландшафта, характера почвогрунтов, строения водосбора, лесистости и заболоченности, наличия озер и др.), видов хозяйственного использования водных ресурсов, так и от местоположения расчетного участка по длине реки: элементы РВБ в зоне формирования стока (верхнее течение) и зоне транзита (среднее и нижнее течение) существенно различаются.

Детальное уравнение РВБ включает три группы данных: гидрометрическую, гидрофизическую и гидрогеологическую. Если значения элементов первой группы могут быть определены по данным основной сети, то для получения сведений об элементах двух других групп необходимы специальные наблюдения. Поэтому часто ограничиваются составлением гидрометрических РВБ, которые включают составляющие, полученные

непосредственно по данным наблюдений и измерений в пунктах гидрологических наблюдений, и гидроморфологические характеристики гидрометрических створов и в целом расчетного участка, определяющие механизм перемещения и трансформации волн паводков.

Уравнение РВБ по гидрометрическим данным может быть представлено в следующем виде:

$$Q_{\text{в}} - Q_{\text{н}} + Q_{\text{бпиз}} + Q_{\text{бпрасч}} + Q_{\text{рпр}} - Q_{\text{прп}} + Q_{\text{о}} = 0, \quad (1)$$

здесь $Q_{\text{бпиз}}$ – расход боковых притоков, определенный гидрометрическим способом; $Q_{\text{бпрасч}}$ – рассчитанный расход неучтенного бокового притока; $Q_{\text{рпр}}$ – расходы руслового и пойменного регулирования, обусловленные потерей воды на аккумуляцию в емкостях русла и поймы или возвратом из них при изменении наполнения русла; $Q_{\text{прп}}$ – суммарные потери стока в русле и на пойме на испарение, заполнение бессточных участков поймы, а также инфильтрацию при выходе воды на надпойменные террасы; $Q_{\text{о}}$ – остаточный член руслового водного баланса.

В уравнении (1) представлены лишь элементы, определяемые гидрометрическим способом или по данным нивелировок гидрометрических створов и русловых съемок участка.

Русловые водные балансы составляются для различных интервалов времени: декада, месяц, год или характерный период хозяйственного использования вод. В ГГИ наряду с методами расчета РВБ за указанные интервалы времени разработан метод расчета РВБ за короткие интервалы времени – сутки, метод расчета динамических русловых водных балансов [3, 4]. Особенность метода расчета РВБ за суточные интервалы времени заключается в том, что расчет необходимо проводить с учетом времени добегания на участке и механизма трансформации паводочной волны при ее перемещении.

Разработка методов краткосрочного прогноза расходов воды на основе расчета динамических русловых водных балансов

Для краткосрочных прогнозов расходов и уровней воды на участках рек в случаях, когда необходим учет механизма трансформации паводочной волны, как правило, используются методы, основанные на приближенных уравнениях трансформации волны или на численном интегрировании уравнений Сен-Венана [5]. В настоящей статье в таких случаях оценку расхода воды в нижнем створе участка предлагается выполнять по измеренным и рассчитанным элементам РВБ на вышерасположенном участке:

$$Q_{\text{н}}(t) = Q_{\text{в}}(t - \tau_{\text{в}}) + \sum_1^k Q_{i\text{бпиз}}(t - \tau_{i\text{бпиз}}) + \\ + Q_{\text{бпрасч}}(t - \tau_{\text{бпрасч}}) \pm Q_{\text{рпр}}(t - \tau_{\text{в}}) - Q_{\text{прп}}(t - \tau_{\text{в}}), \quad (2)$$

где τ_v – время добегания на участке от верхнего до нижнего створа; k – количество боковых притоков на расчетном участке, на которых измеряется сток; $Q_{i\text{юпитз}}$ – расход воды, измеренный на i -том боковом притоке; $Q_{\text{бпрасч}}$ – расход воды, рассчитанный для неучтенного бокового притока; $\tau_{i\text{юпитз}}$ – время добегания от гидрометрического створа на i -м боковом притоке; $\tau_{\text{бпрасч}}$ – время добегания, рассчитанное для неучтенного бокового притока.

Уравнение (2) может быть использовано для краткосрочного прогноза расхода воды в нижнем створе с заблаговременностью прогноза $\tau_{\text{п}} = \min(\tau_v, \tau_{i\text{юпитз}}, \tau_{\text{бпрасч}})$.

В рамках научных работ по исследованию причин и последствий катастрофического паводка 2013 г. в бассейне р. Амур был выполнен расчет и анализ РВБ за различные интервалы времени (декада, месяц, год) для участка от г. Хабаровска до г. Комсомольска-на-Амуре и разработана методика расчета динамических русловых водных балансов, которая позволила по данным о расходах в Хабаровске и боковых притоков на этом участке рассчитать ежедневные расходы воды в период открытого русла 2013 г. в Комсомольске-на-Амуре с заблаговременностью 4–5 сут [3]. Использование метода расчета динамических РВБ для краткосрочного прогноза расходов воды в створе гидрологического поста (ГП) р. Амур – г. Комсомольск-на-Амуре было проверено по данным многоводных лет.

Для прогноза применялись данные о расходах воды по ГП г. Хабаровска, расходы боковых притоков, на которых ведутся измерения, неучтенный боковой приток с площади водосбора, неосвещенной измерениями, расходы руслового и пойменного регулирования, суммарные потери в русле и на пойме.

Боковой приток на расчетном участке учитывался по данным наблюдений на трех притоках р. Амур на следующих гидрологических постах: р. Тунгуска – ГП с. Архангеловка, р. Манома – ГП с. Манома 1-я, р. Гур – ГП пос. Снежный. Суммарная площадь водосборов этих притоков, освещенная наблюдениями за стоком, составляет 39 680 км². Неосвещенная наблюдениями площадь водосбора на участке составляет 60 320 км². Сток с территории, не освещенной наблюдениями за стоком, оценивался по методу аналогии с корректирующим коэффициентом 0,9. В качестве аналогов использованы все три указанных выше притока, на которых ведется учет стока воды.

Расходы руслового и пойменного регулирования рассчитывались по формуле

$$Q_{pp} = -\frac{\Delta W}{T}. \quad (3)$$

Здесь ΔW – изменение объема в русле и пойме за расчетный интервал времени РВБ (T).

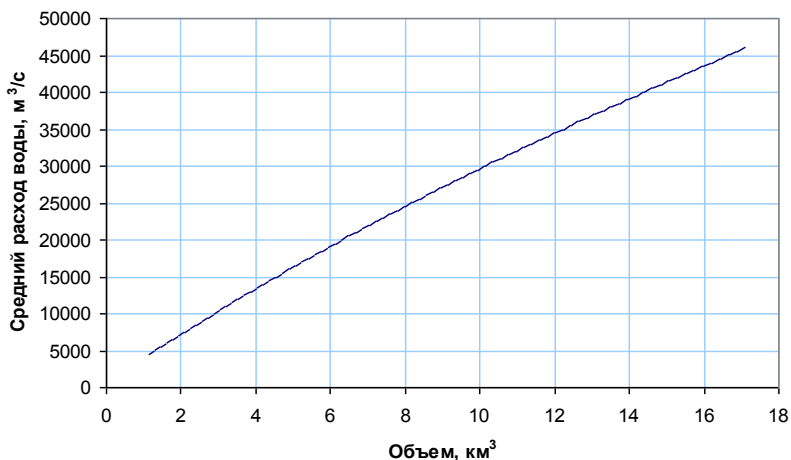


Рис. 1. Кривая объемов русла и поймы на участке р. Амур от Хабаровска до Комсомольска

Для участка реки Амур от Хабаровска до Комсомольска получена зависимость объемов русла и поймы от среднего значения расхода воды на участке (рис. 1). Для этого были использованы данные нивелировок трех морфометрических створов: выше моста в г. Хабаровск, в с. Елабуга, выше моста в г. Комсомольск – и полученные на их основе зависимости площадей поперечного сечения от уровней воды ближайших гидрологических постов.

С использованием кривой объемов воды на участке W , как функции расхода $W(Q)$ или уровня воды $W(H)$, отражающей в суммарном виде главнейшие особенности морфометрии и гидравлики участка реки и позволяющей учесть при расчете элементы неустановившегося движения речного потока, обуславливающие трансформацию расходов воды по его длине и изменения объема воды в русле (русловых емкостях) и, при выходе воды на пойму, в пойменных емкостях.

Для оценки потерь стока на пойме получена эмпирическая зависимость их величины от расходов руслового и пойменного регулирования.

$$Q_{\text{прп}} = -0,66Q_{\text{руп}} - 2216. \quad (4)$$

Анализ остаточных членов суточных РВБ показал, что при превышении транзитным расходом воды значений близких к 20 тыс. м³/с имеют место систематические односторонние невязки стока. Эти невязки можно объяснить потерями воды на испарение, заполнение бессточных участков поймы, а также инфильтрацией при выходе воды на надпойменные террасы. Механизм формирования потерь трудно формализовать, поэтому для

их учета была получена эмпирическая зависимость (4) на основе выявления зависимости невязок ежедневных РВБ многоводного 2013 от рассчитанных расходов пойменного и руслового регулирования для периода, когда транзитный расход превышал 20 тыс. м³/с. Несмотря на то, что относительное среднеквадратическое значение рассеяния связи (4) превышает 30 %, эффективность ее использования была подтверждена расчетами РВБ в многоводные 1959 и 1984 гг. [3].

Краткосрочные прогнозы расходов воды по методу расчета динамических РВБ составлены для периодов свободного состояния русла лет повышенной водности: 1959, 1984, 2013, 2018, 2019, 2020, 2021 гг.

В рамках исследований была выполнена проработка, в ходе которой для прогноза расхода воды в створе ГП р. Амур – г. Комсомольск-на-Амуре получено уравнение множественной линейной регрессии, в котором закономерности перемещения паводочной волны на расчетном участке оценивались на основе идентификации параметров регрессионной зависимости, включающей в качестве предикторов расходы воды в ограничивающих створах с заблаговременностью 6 сут и суммарные расходы бокового притока с заблаговременностью 5 сут.

Уравнение для прогноза расхода воды в г. Комсомольске-на-Амуре получено в виде

$$Q_{К-н-А}(t) = a_0 + a_1 Q_{К-н-А}(t-6) + a_2 Q_X(t-6) + a_3 \sum Q_{6п}(t-5), \quad (5)$$

где $Q_{К-н-А}(t)$ – расход воды в г. Комсомольске-на-Амуре на дату прогноза t ; $Q_{К-н-А}(t-6)$ и $Q_X(t-6)$ – расход воды в г. Комсомольск-на-Амуре и г. Хабаровске на дату $(t-6)$; $\sum Q_{6п}(t-5)$ – суммарный боковой приток на участке на дату $(t-5)$.

Идентификация параметров уравнения (5), приведенных в табл. 1, выполнена по данным многоводного 1959 г. и многоводного 2013 г. В табл. 1 приведены также характеристики качества полученных уравнений: относительное значение несмещенной оценки стандарта рассеяния $\tilde{\sigma}_{ур}$ и коэффициент множественной линейной регрессии R .

Таблица 1

**Параметры уравнения множественной линейной регрессии
для прогноза расхода воды р. Амур на ГП г. Комсомольск-на-Амуре**

Совокупность исходных данных	Параметры уравнения				Характеристики качества УР	
	a_0	a_1	a_2	a_3	$\tilde{\sigma}_{ур}, \%$	R
1959 г.	1239,152	0,486089	0,446743	0,238067	3,8	0,995
2013 г.	-1434,65	0,597323	0,423132	0,27413	1,9	0,998

Для оценки эффективности разработанных методов краткосрочного прогноза были использованы следующие критерии:

- широко используемый для оценки качества гидрологических моделей критерий Нэша–Сатклиффа;
- критерий на основе сравнения погрешности разработанного метода с погрешностью инерционного прогноза с заблаговременностью 5 сут.

Критерий Нэша–Сатклиффа (NSE) [6] применялся в следующем виде

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{ЕДС}i} - Q_{\text{пр}i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{ЕДС}i} - \bar{Q}_{\text{ЕДС}})^2}, \quad (6)$$

где $Q_{\text{ЕДС}}$ – значение расхода воды, рассчитанное в режимном варианте учета стока и опубликованное в справочнике водного кадастра «Ежегодные данные суши» (ЕДС); $Q_{\text{пр}}$ – прогнозное значение расхода воды; $\bar{Q}_{\text{ЕДС}}$ – среднее арифметическое ряда за период сравнения; n – длина периода сравнения в сутках.

Критерий на основе сравнения погрешности разработанного метода прогноза S с погрешностью альтернативного метода расчета – инерционного прогноза с заблаговременностью 5 сут. В отечественной практике применение методики гидрологического прогнозирования считается оправданным, если ее погрешность явно ниже погрешности альтернативного прогноза [7].

Вывод о применимости метода прогноза делается на основании отношения S/c . В зависимости от этого показателя и длины расчетного ряда n оценивается эффективность метода. По полученным оценкам метод относится к одной из трех возможных категорий: при $n > 25$ метод считается хорошим при $S/c < 0,50$, удовлетворительным при $0,50 < S/c < 0,80$ и неудовлетворительным при $S/c > 0,80$ [5, 7].

Здесь S – среднее квадратическое значение погрешности краткосрочного прогноза по разработанному методу (абсолютное, м³/с); c – среднее квадратическое значение погрешности инерционного прогноза.

В табл. 2 приведены оценки эффективности данных прогноза, полученные при использовании метода расчета динамических РВБ и вариантов уравнения множественной регрессии с параметрами, рассчитанными по данным 1959 и 2013 гг.

Как видно из табл. 2, при использовании обоих методов (метода расчета динамических РВБ и метода множественной линейной регрессии) получены оценки качества прогноза не ниже удовлетворительной. Лучшие результаты прогнозных значений для 2018–2021 гг. выявлены при использовании комбинированного метода прогноза, в котором прогнозное зна-

Таблица 2

**Результаты оценки эффективности предлагаемых методов прогноза
для ГП р. Амур – г. Комсомольск-на-Амуре**

Год	Период	Длительность периода, n	Средний расход, м ³ /с	Метод	Относительные расхождения, %			Оценки эффективности	
					среднее	средне-квадратичное	наибольшее	S/c	NSE
1959	01.05–07.11	190	19 800	РВБ	3,8	8,52	29,6	0,62	0,97
				УРМ_2013	-6,5	11,1	-47,2	0,81	0,96
1984	05.05–06.11	185	19 580	РВБ	0,36	7,08	-26,9	0,7	0,94
				УРМ_1959	4,5	8,40	-29,0	0,63	0,95
2013	15.05–10.11	180	24 500	РВБ	-4,07	7,05	-26,0	0,63	0,95
				УРМ_1959	2,4	4,4	15,4	0,38	0,99
2018	10.05–16.11	190	14 400	РВБ	-3,6	9,0	-27,1	0,6	0,96
				УРМ_1959	2,8	8,5	25,5	0,61	0,97
				УРМ_2013	-9,2	12,2	-32,9	0,94	0,93
				Комб.	-2,6	5,3	-15,8	0,97	0,60
2019	02.05–07.11	190	20 300	РВБ	-3,35	9,0	26,6	0,97	0,67
				УРМ_1959	1,0	7,6	37,7	0,99	0,46
				УРМ_2013	-5,8	10,8	-33,3	0,98	0,57
				Комб.	2,2	6,6	20,1	0,99	0,43
2020	04.05–07.11	188	19 350	РВБ	2,19	8,26	-26,5	0,96	0,75
				УРМ_1959	4,3	7,9	31,0	0,97	0,68
				УРМ_2013	-4,9	7,8	-17,7	0,97	0,71
				Комб.	0,3	4,4	14,0	0,99	0,47
2021	02.05–10.11	193	23 050	РВБ	0,33	7,2	38,3	0,9	0,71
				УРМ_1959	2,5	5,7	22,7	0,95	0,62
				УРМ_2013	-2,8	4,8	-28,2	0,95	0,6
				Комб.	-0,2	3,9	16,1	0,97	0,44

чение на расчетную дату рассчитано как средняя величина из значений, полученных по методу РВБ и методу множественной регрессии (УРМ):

$$Q_{\text{Комб}}(t) = Q_{\text{РВБ}}(t) + Q_{\text{УРМ}}(t)/2. \quad (7)$$

Здесь $Q_{\text{Комб}}(t)$ – прогнозное значение расхода воды по комбинированной методике; $Q_{\text{РВБ}}(t)$ – прогнозное значение расхода воды по методу динамических РВБ; $Q_{\text{УРМ}}(t)$ – прогнозное значение расхода воды по методу множественной регрессии.

На рис. 2 и 3 приведены гидрографы стока для наиболее многоводных лет – 2013 и 2021 гг.: фактический и прогнозные, полученные с помощью разных методов прогноза.

Следует обратить внимание на тот факт, что для проверки эффективности методов использовались данные таблиц справочников водного кадастра, полученные в режимном варианте учета стока, т. е. после всесто-

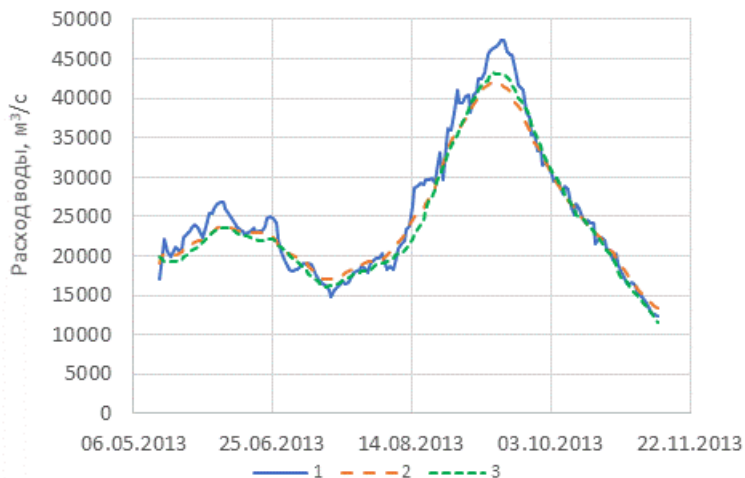


Рис. 2. Гидрографы стока р. Амур – г. Комсомольск-на-Амуре, 2013 г.
1 – прогноз по РВБ, 2 – прогноз по УРМ, 3 – фактический

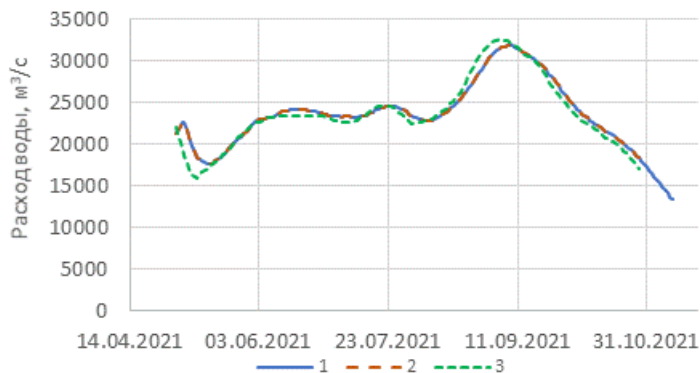


Рис. 3. Гидрографы стока р. Амур – г. Комсомольск-на-Амуре, 2021 г.
1 – прогноз по РВБ, 2 – прогноз по УРМ, 3 – фактический

роннего анализа данных наблюдений на гидрологических постах за весь расчетный год. В оперативной обстановке для прогнозирования приходится использовать данные оперативного учета стока, погрешности которого заведомо больше погрешностей режимного, поэтому и ошибки реальных прогнозов могут оказаться несколько выше приведенных в табл. 2. При этом расчет элементов динамических русловых водных балансов и анализ надежности их расчета являются единственными объективными инструментами контроля учета стока в оперативном режиме. Следует помнить, что главной задачей расчета РВБ остается вопрос оценки надежности расчета элементов РВБ и увязка речного стока по длине реки.

Метод расчета динамических РВБ был разработан также для участка р. Оби от г. Барнаула до г. Камня-на-Оби [4]. Для прогноза расхода воды на ГП р. Обь – г. Камень-на-Оби с заблаговременностью 3 сут. используются данные наблюдений за стоком воды в створах ГП Барнаула, на притоке ГП р. Чумыш – пгт. Тальменка, расчетные данные неучтенного бокового притока, руслового и пойменного регулирования с использованием зависимости объема русла и затапливаемой поймы от среднего уровня на участке, полученной на основе анализа и обработки картографического материала и спутниковых снимков. Были получены характеристики заполнения русловых и пойменных форм на участке р. Оби от г. Барнаула до г. Камня-на-Оби в период прохождения половодья и паводков различной обеспеченности [4].

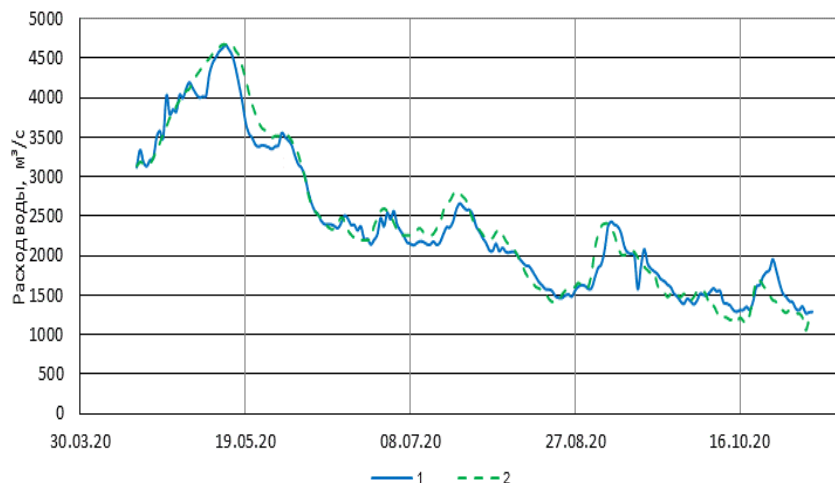


Рис. 4. Гидрографы стока р. Обь – г. Камень-на-Оби, 2020 г.

1 – прогноз по РВБ, 2 – фактический

Таблица 3

**Результаты оценки эффективности метода краткосрочного прогноза
для ГП р. Обь – г. Камень-на-Оби**

Период	Длительность периода, n	Метод	Относительные расхождения, %			Оценки эффективности	
			среднее	средне-квадратичное	наибольшее	S/c	NSE
16.04–07.11	206	РВБ	0,7	8,7	36,1	0,89	0,97
		Инерционный	1,9	8,9	32,5		
18.04–18.06	60	РВБ	–2,0	4,9	–13,1	0,83	0,98
		Инерционный	1,4	7,2	19,0		

По критерию NSE метод прогноза с использованием РВБ везде должен быть признан хорошим, а сравнение результатов прогноза по методу расчета динамических РВБ с данными инерционного прогноза показывает, что качество метода прогноза можно признать удовлетворительным только при прохождении пиков волн половодий и паводков. При плавном изменении расходов воды результаты прогнозирования с использованием динамических РВБ сопоставимы с результатами инерционного прогноза.

На рис. 4 представлены прогнозный и фактический гидрографы стока в створе ГП р. Обь – г. Камень-на-Оби за 2020 г., а в табл. 3 – результаты оценки эффективности метода прогноза за различные интервалы времени.

Как видим по значениям критерия S/c , даже для периода прохождения пика половодья метод прогноза с использованием динамических РВБ следует с натяжкой отнести к категории «удовлетворительный», несмотря на то, что среднеквадратическая и наибольшая ошибки прогноза для периода прохождения основной волны половодья с 18 апреля по 18 июня 2020 г. ниже, чем при использовании инерционного прогноза, на 2,3 и 4,9 % соответственно.

Выводы

Результаты исследований и численных экспериментов показали, что разработанная методика расчета суточных (динамических) РВБ на примере участков рек Амур и Обь может быть рекомендована как для анализа надежности учета стока в гидрометрических створах, так и для использования при оперативном мониторинге водного режима, в том числе как дополнительный инструмент при краткосрочном прогнозировании расходов воды в замыкающих створах.

Литература

1. Методические указания управлениям гидрометслужбы. Л.: Гидрометеиздат, 1977. № 90. 104 с.
2. *Карасев И.Ф.* Речная гидрометрия и учет водных ресурсов. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 310 с.
3. *Яковлева Т.И., Шарина Ю.В.* Расчет и анализ русловых водных балансов на участке реки Амур: г. Хабаровск – г. Комсомольск-на-Амуре // Сборник «Экстремальные паводки в бассейне Амура: гидрологические аспекты». СПб., 2015. С. 122–134.
4. *Яковлева Т.И., Изъюрова Ю.В., Терехов А.В.* Контроль данных учета стока в гидрометрических створах на основе расчета русловых водных балансов (на примере участка реки Обь) // Материалы IV Всероссийской научной конференции с международным участием «Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии»: В 3 т. Т. 1. Барнаул, 2022. С. 263–271.
5. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 245 с.
6. *Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Binger R.L., Harmel R.D., Veith T.L.* Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations // Transactions of the ASABE. 2007. Vol. 50, No. 3. P. 885–900.
7. *Бориц С.В., Христофоров А.В.* Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. 2015. Спец. вып. 355. 198 с.

ДОЛГОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МАКСИМАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ ВОДЫ Р. ПЯКУПУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Н.А. Саноцкая

ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (АНИИ), Санкт-Петербург

Актуальность повышения достоверности гидрологических прогнозов только повышается. Особенно важны гидрологические прогнозы на северных реках, с учетом их транспортного значения. В статье представлен алгоритм долгосрочного прогнозирования уровней воды с помощью нейросети с привлечением суточных значений метеорологических параметров.

Ключевые слова: гидрологические прогнозы, уровни воды, долгосрочный прогноз, нейросеть.

LONG-TERM FORECASTING OF THE MAXIMUM WATER LEVELS OF THE PYAKUPUR RIVER USING NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES

N.A. Sanotskaya

*Arctic and Antarctic Research Institute (AARI),
St. Petersburg*

The relevance of improving the reliability of hydrological forecasts is only increasing. Especially important are hydrological forecasts for the northern rivers, taking into account their transport significance. The article presents an algorithm for long-term forecasting of water levels using a neural network using daily values of meteorological parameters.

Key words: hydrological forecasts, water levels, long-range forecast, neural network.

Долгосрочное прогнозирование максимальных уровней воды является весьма сложной задачей вообще и в Арктической зоне РФ в частности. Связано это с тем, что на максимальный уровень воды оказывает влияние множество факторов. Основными из них являются: дождливая осень, су-

ровая зима, большое снегонакопление, запоздалая холодная весна (или же ранняя весна, но очень дружная) с большим количеством осадков, резкое установление теплой погоды [1–4].

В последнее время активно развиваются методы, основанные на нейронных сетях, и они показывают высокую эффективность при решении разнообразных задач, в том числе для прогнозирования уровней воды [5].

Глубокие нейронные сети в настоящее время становятся одним из самых популярных методов машинного обучения. Одна из причин успешного применения глубоких НС заключается в том, что сеть автоматически выделяет из данных важные признаки, необходимые для решения задачи. При обработке больших объемов данных нейронная сеть справляется с выделением признаков гораздо лучше, чем человек.

Объектом исследования выбрана р. Пякупор, которая является левой составляющей р. Пур и протекает по территории Пуровского района Ямало-Ненецкого автономного округа. Гидрологический пост на реке расположен на расстоянии 3,40 км от устья в г. Тарко-Сале. Площадь водосборасоставляет 31 400 км². Пост открыт 01.08.1938 г. и действует в настоящее время. Отметка нуля поста равна 15,31 м БС. Река Пякупор берет свое начало слиянием рек Янкьягун и Нючавотьяха на возвышенности Сибирские Увалы, течет на северо-восток по заболоченной и лесистой низменности.

В качестве исходных данных для построения нейросети выбраны следующие параметры: температура воздуха, температура поверхности почвы, сумма осадков, снежный покров, относительная влажность, дефицит насыщенного водяного пара, температура точки росы, направление ветра, средняя скорость ветра. Значения перечисленных параметров получены с сайта <http://aisori-m.meteo.ru/> с дискретностью в одни сутки и за период с 1 сентября по 28 февраля за весь период наблюдений (до 2020 г.).

Для примера анализа исходных данных представлены колебания дат появления и разрушения снежного покрова и наступления максимальных снегозапасов на графиках рис. 1. По графикам видно, что за период наблюдений с 1936 по 2020 г. значимых трендов в датах не наблюдается.

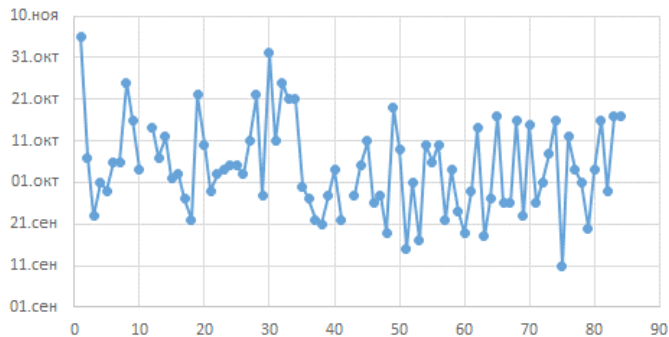
В связи с тем, что исходные данные являются временными, они сохраняются в трехмерном тензоре с явной осью времени (рис. 2). В соответствии с соглашениями ось времени всегда является второй осью (ось с индексом 1) [6].

Нейронные сети можно рассматривать как сложные геометрические преобразования, выполняющиеся в многомерном пространстве через последовательность простых шагов, состоящих из операций с тензорами.

Для решения задачи использовалось программное обеспечение, реализованное на языке программирования Python в связке с модулями для работы с нейросетями TensorFlow и Keras. Keras – это фреймворк под-

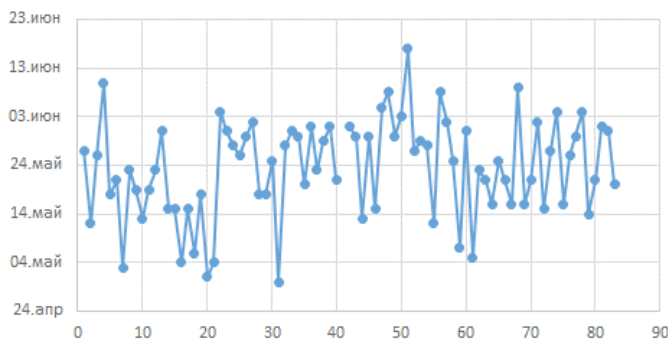
а

Появление снежного покрова



б

Окончательный сход снежного покрова



в

Образование устойчивого снежного покрова

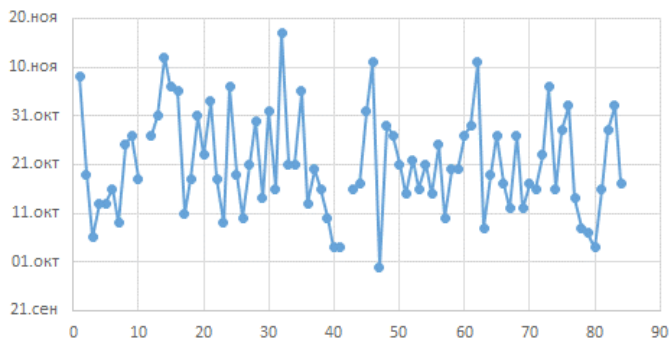
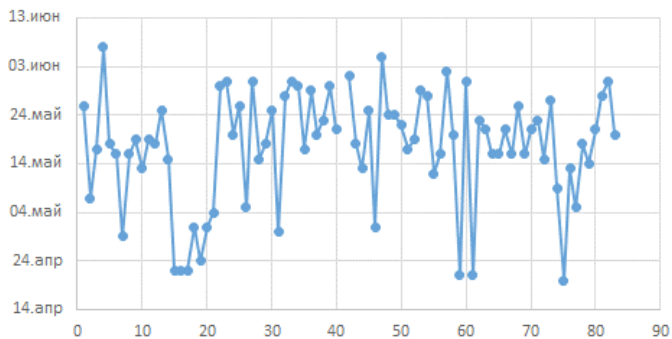


Рис. 1 (начало). Даты образования и схода снежного покрова (а–д) по метеостанции Тарко-Сале за период наблюдений 1936–2020 гг.

2

Сход устойчивого снежного покрова



δ

Наступление максимальных снегозапасов

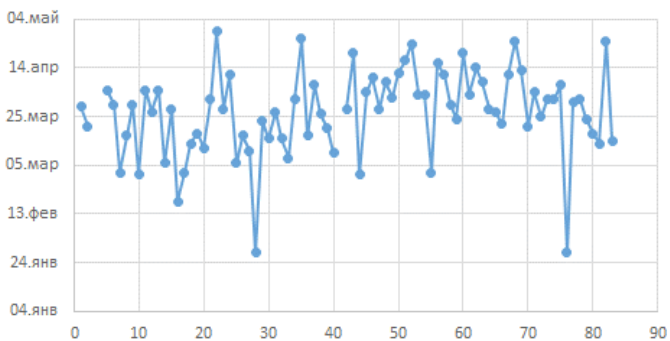


Рис. 1 (окончание).

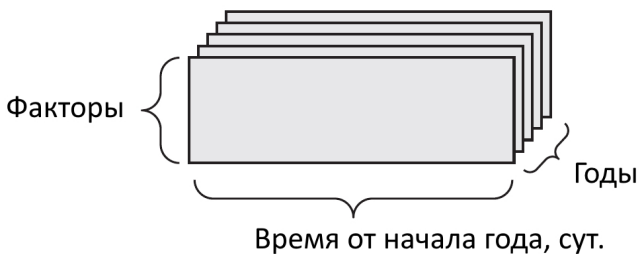


Рис. 2. Трехмерный тензор с временным рядом

держки глубокого обучения для Python, который предоставляет простой и удобный способ создавать и обучать различные модели глубокого обучения.

Основные подходы к решению задачи:

1) Для решения использовалась сверточная нейросеть. Сеть данной архитектуры обучается быстрее по сравнению с полносвязными нейронными сетями за счет более детального поиска информационных признаков.

2) В качестве функции потерь (loss) использовалась бинарная кросс-энтропия (binary crossentropy) [6]. Для поиска оптимального решения применялся оптимизатор RMSprop. Выбирались модели с максимальным счетом по результатам валидации.

3) Для устранения эффекта «переобучения» введен слой Dropout, который «разряжает» нейронный слой путем поочередного отключения заданного количества.

4) Исходные данные разбиваются на обучающую выборку (1939–2015) и проверочную (2016–2020).

Процесс обучения нейросети можно представить в виде упорядоченной последовательности действий (шагов):

Шаг 1. Сбор исходных данных.

Шаг 2. Представление исходных данных за каждый год в отдельном файле в формате .csv. Название файла является искомым значением.

Шаг 3. Подача на вход нейронной сети массива исходных данных и расчет нейросетью максимального уровня воды.

Шаг 4. Вычисление ошибки между рассчитанными нейросетью максимальными уровнями воды и исходными.

Шаг 5. Корректировка значений весовых коэффициентов нейросети.

Шаг 6. Повторить Шаг 3–Шаг 5 до достижения минимальной ошибки или необходимой точности определения.

Нейронные сети отличаются от математических функций и алгоритмов тем, что требуют обучения перед использованием. Обучение нейронной сети состоит в настройке весов связей между нейронами так, чтобы сеть приближалась к нужной функции с заданной точностью. Существует три метода обучения нейронных сетей: обучение с учителем, обучение без учителя и обучение с подкреплением. При обучении с учителем сети подаются наборы входных сигналов и соответствующие правильные ответы. Веса изменяются в зависимости от правильности выходных сигналов сети. При обучении без учителя входные сигналы не имеют известных правильных ответов. Обучение с подкреплением предполагает взаимодействие сети с внешней средой и основано на получении сигналов от этой среды.

Для обучения нейронных сетей, включая глубокие сети, в настоящее время широко используется алгоритм обратного распространения ошибки, основанный на градиентном спуске. Этот алгоритм использует обучение

с учителем и требует обучающего набора с известными правильными ответами. Мера ошибки определяет, насколько сильно выходные значения сети отличаются от правильных ответов. Затем методом градиентного спуска минимизируется эта ошибка путем изменения весов в сети. Для оценки влияния каждого веса на выходное значение вычисляются частные производные ошибки по весам. Веса изменяются с учетом градиента, и этот процесс повторяется до достижения допустимой ошибки. Начальные значения весов задаются случайным образом.

В глубоких нейронных сетях с несколькими скрытыми слоями ошибка распространяется от выходного слоя к входному. Сначала вычисляется ошибка на выходе сети, для которой известны правильные ответы. Затем вычисляется ошибка на входе выходного слоя, которая используется как ошибка на выходе скрытого слоя. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будет известна ошибка на входе сети. Именно поэтому этот алгоритм называется обратным распространением ошибки.

Цикл обучения включает следующие шаги, которые повторяются столько раз, сколько необходимо:

1. Извлекается пакет x обучающих примеров и соответствующих целей y .
2. Сеть проходит пакет x (этот шаг называется прямым проходом) и получает пакет предсказаний y_{pred} .
3. Вычисляются потери сети на пакете, отображающие расхождение между y_{pred} и y .
4. Корректируются веса сети, чтобы немного уменьшить потери на этом пакете.

В результате сеть показывает очень низкие потери на тренировочном наборе данных, что означает малое расхождение между предсказанными значениями y_{pred} и ожидаемыми целями y . Сеть успешно «научилась» преобразовывать входные данные в правильные выходные значения.

Для решения поставленной задачи использован код на Python, основная содержательная часть которого представляет собой следующее:

```
model = Sequential()
model.add(ZeroPadding2D((1,1),input_shape=(181,16,1)))
model.add(Convolution2D(64, 3, 3, activation='relu'))
model.add(ZeroPadding2D((1,1)))
model.add(Convolution2D(64, 3, 3, activation='relu'))
model.add(MaxPooling2D((2,2), strides=(2,2))).
```

Всего использовано семь слоев. При 20 000 эпох получен удовлетворительный результат (табл. 1). Функция потерь и график ошибок представлены на рис. 3, 4.

Таким образом, в нашей работе представлен способ подготовки исходных данных для реализации процесса обучения нейросети. Предложе-

Таблица 1

Результат работы программы

Параметр, см	2016	2017	2018	2019	2020
Расчетное значение уровня воды	995	983	962	969	919
Наблюденное значение уровня воды	965	925	931	949	916
Ошибка	30	58	31	20	3

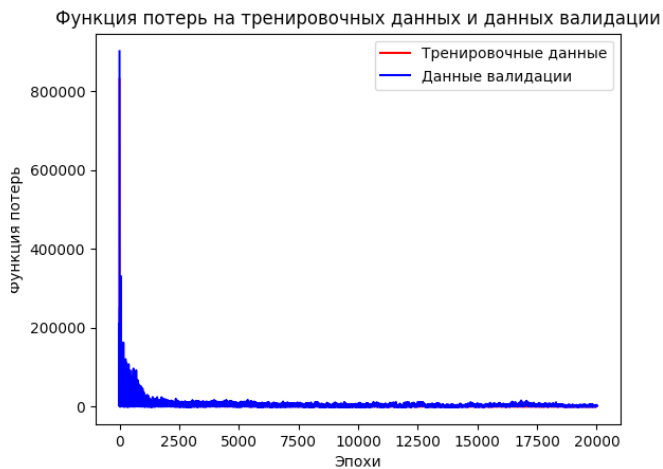


Рис. 3. График функции потерь

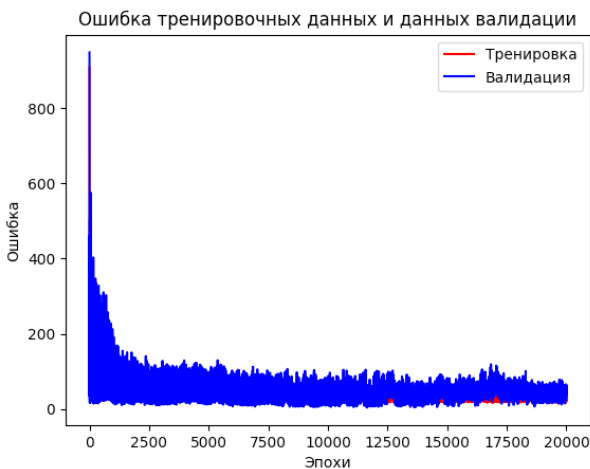


Рис. 4. График изменения значения ошибки в зависимости от эпохи

но использование сверточной нейросети для долгосрочного прогнозирования максимального уровня воды р. Пякупур в створе Тарко-Сале. Заблаговременность прогноза составляет порядка трех месяцев, поскольку в программе используются данные до 28 февраля текущего года при том, что максимальный уровень воды проходит в конце мая–начале июня. Реализация предложенного подхода позволит повысить эффективность долгосрочных прогнозов максимальных уровней.

Литература

1. Разработка на основе математической модели методов и программного обеспечения долгосрочных прогнозов максимальных уровней воды для Средней Оби, Енисея с притоками, р. Бирюсы и р. Лены (включая уровни воды заторного происхождения), и краткосрочных прогнозов ежедневных уровней воды рек Селенга и Онон: Отчет о НИР (закл.) / ФГБУ «СибНИГМИ»; шифр темы 1.7.49; рук. Д.А. Бураков. Новосибирск, 2013. 111 с. № ГР 01201178224. Инв. № 02201454632.
2. Бураков Д.А. Математическая модель расчета весеннего половодья для равнинных заболоченных бассейнов // Метеорология и гидрология. 1978. № 1. С. 49–59.
3. Бураков Д.А., Адамович А.А. Долгосрочные прогнозы притока воды в водохранилища Сибирских ГЭС с применением математической модели // Метеорология и гидрология. 2006. № 1. С. 95–105.
4. Бураков Д.А., Космакова В.Ф., Гордеев И.Н. Результаты испытания физико-статистического метода долгосрочного прогноза максимальных уровней воды весеннего половодья р. Енисей у г. Кызыл // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. Информационный сборник № 39. 2012. С. 121–126.
5. Саноцкая Н.А., Лоскутов Д.А., Ромашова К.В. Прогнозирование максимального уровня воды рек как обобщенного параметра состояния сложной нелинейной системы на основе использования многослойной нейронной сети // Технологии гражданской безопасности. 2022. Т. 19, № 2 (72). С. 14–20.
6. Шолле Ф. Глубокое обучение на Python. 2-е межд. издание. СПб.: Питер, 2023. 576 с.

Научное издание

ТРУДЫ
СИБИРСКОГО РЕГИОНАЛЬНОГО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Выпуск 108

ПРОБЛЕМЫ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ,
ЭКОЛОГИИ, КЛИМАТА СИБИРИ

Технический редактор *Н.М. Райзвих*
Корректор *А.С. Бочкова*

Подписано в печать 00.00.2023.
Формат 60×90/16. Уч.-изд. л. 15,3. Усл. печ. л. 16,6.
Тираж 300 экз. Заказ 000.

Сибирское отделение РАН
630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 17
Отпечатано в Сибирском отделении РАН
630090, Новосибирск, Морской просп., 2
Тел. (383) 330-84-66, e-mail: e.lyannaya@sb-ras.ru