

ISSN 0130-2906

# МЕТЕОРОЛОГИЯ И ГИДРОЛОГИЯ

2018 № 8

ФГБУ "Научно-исследовательский центр  
космической гидрометеорологии "Планета"





ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

# МЕТЕОРОЛОГИЯ И ГИДРОЛОГИЯ

2018 № 8  
август

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ

*Издается с 1891 г.,  
с сентября 1935 г. —  
под настоящим  
названием*

ФГБУ “Научно-исследовательский центр  
космической гидрометеорологии “Планета”

Адрес: 123242 Москва, Б. Предтеченский пер., 7  
Телефон: (499) 795-20-53, 252-36-94  
Факс: (499) 252-66-10  
e-mail: mig@planet.iitp.ru  
web site: www.mig-journal.ru

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР —

*В. В. АСМУС*

РЕДКОЛЛЕГИЯ:

*Ю. Д. РЕСНЯНСКИЙ (зам. главного редактора)*

*А. Р. ИВАНОВА (ответственный секретарь)*

*М. В. БОЛГОВ*

*А. А. ВАСИЛЬЕВ*

*С. А. ДОБРОЛЮБОВ*

*А. Д. КЛЕЩЕНКО*

*В. Н. КРЫЖОВ*

*В. П. МЕЛЕШКО*

*С. М. СЕМЕНОВ*

*М. А. ТОЛСТЫХ*

*А. В. ХРИСТОФОРОВ*

*Г. М. ЧЕРНОГАЕВА*

*Ю. С. ЦАТУРОВ*

---

Ежемесячный научно-технический журнал “Метеорология и гидрология” является рецензируемым изданием и входит в Перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий ВАК.

Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования, а также в международные реферативные базы данных или системы цитирования Web of Science, Scopus и Springer.

Электронные версии журнала на русском языке доступны на сайте Научной электронной библиотеки <http://www.elibrary.ru> и на сайте журнала <http://www.mig-journal.ru>.

Журнал переводится на английский язык с 1976 г. Электронные версии статей на английском языке доступны на сайте <http://link.springer.com>.

Плата за публикацию статей не взимается.

---

Заведующая редакцией *В. В. Борисова*

Корректор *Е. Е. Смирнова*

Верстка *И. В. Ломакиной*

Рисунки *А. И. Гавриченко*

Подписано к печати 17.08.2018. Формат 70x108 1/16

Усл.печ.л. 11,2. Усл.кр.-отг. 8,55.

Уч.-изд.л. 11,87. Тираж 300.

Индекс ММ-9.

---

Учредитель журнала — Федеральная служба  
по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

Набрано в ФГБУ “НИЦ “Планета”  
123242 Москва, Б. Предтеченский пер., 7  
Отпечатано ЗАО “АС-Медиа”, 125252 Москва, ул. Зорге, д. 15

© ФГБУ “Научно-исследовательский центр  
космической гидрометеорологии “Планета”,

“Метеорология и гидрология”, 2018

Свидетельство о регистрации № 014815 от 16 мая 1996 г.

*А. Н. Багров, Ф. Л. Быков, В. А. Гордин*

Схема оперативного краткосрочного комплексного прогноза приземной температуры и влажности воздуха 5

*А. А. Синькевич, В. Б. Попов, И. А. Тарабукин,  
Е. В. Дорофеев, Ю. А. Довгалюк, Н. Е. Веремей,  
Ю. П. Михайловский, В. С. Снегуров, А. В. Снегуров*

Изменения характеристик конвективных облаков и выпадающих осадков при слиянии облаков 19

*Г. И. Долгих, А. А. Плотников*

Особенности возникновения морских инфрагравитационных волн 33

*В. П. Евстигнеев, Д. В. Мишин, Л. П. Остроумова*

Расчет количества выпадающих на поверхность Азовского моря осадков как составляющей его водного баланса 39

*Н. А. Сперанская, Т. В. Фуксова*

Многолетние изменения основных составляющих водного режима озера Ханка 53

*А. А. Соколов, А. Н. Бугаец*

К вопросу об оценке методов краткосрочного прогноза гидрологических величин 65

*И. Л. Калужный*

Общие черты формирования гидрохимического режима основных типов болот России 72

*З. Рамак, Д. Порхематт, Х. Седghi,*

*И. Фаттах, М. Лашни-Занд*

Влияние изменений климата на водный режим и максимальный сток на примере водосбора р. Карун, Иран 82

*Д. Е. Клименко, Е. С. Черепанова,*

*Л. В. Габова, И. В. Шапова*

Сравнительный статистический анализ данных наблюдений осадкомеров и плувиографов для оценки характеристик паводкоформирующих осадков на территории Урала 91

*Г. В. Шевченко, М. О. Хузеева,*

*В. Е. Ячменев, А. А. Шишкин*

Экстремальные штормы вблизи Курильских островов по данным визуальных и инструментальных измерений 100

*Ю. П. Переваденцев*

В. В. Осечкин “Русско-английский толковый метеорологический словарь”, СПб, ООО “Эль-Принт”, 2018, 391 с. 107

*А. А. Васильев*

В. Н. Прямыцын “Отечественная гидрометеорология в годы Первой мировой и Гражданской войн (1914—1921 гг.)”. СПб, Дмитрий Буланин, 2018, 336 с. 108

Российский национальный юниорский водный конкурс 109

*Д. В. Поздняков, А. К. Горохов, К. Г. Горохов*

Использование программы “Google Earth” при изучении водной флоры 110

*Е. С. Дмитриевская, Т. А. Красильникова, О. А. Маркова*

О загрязнении природной среды и радиационной обстановке на территории Российской Федерации в мае 2018 г. 116

*Л. Н. Паршина*

Погода на территории Российской Федерации в мае 2018 г. 122

*Т. В. Бережная, А. Д. Голубев, Л. Н. Паршина*

Аномальные гидрометеорологические явления на территории Российской Федерации в мае 2018 г. 126

*А. М. Звягинцев, Н. С. Иванова, Г. М. Крученицкий,*

*И. Н. Кузнецова, В. А. Лапченко, В. В. Широков*

Содержание озона над территорией Российской Федерации во втором квартале 2018 г. 138

Г. Г. Шукин (к 80-летию) 142

К 50-летию Сибирского центра “НИЦ “Планета” 143

Памяти А. М. Звягинцева (1945—2018 гг.) 144

## СООБЩЕНИЯ

## ПРИБОРЫ, НАБЛЮДЕНИЯ, ОБРАБОТКА

## КРИТИКА И БИБЛИОГРАФИЯ

## ЮНИОРСКИЙ ВОДНЫЙ КОНКУРС

## ОБЗОРЫ И КОНСУЛЬТАЦИИ

## ХРОНИКА

	<i>A. N. Bagrov, F. L. Bykov, and V. A. Gordin</i>	
	Operative Scheme for the Short-range Complex Forecasting of Surface Air Temperature and Humidity	5
	<i>A. A. Sin'kevich, V. B. Popov, I. A. Tarabukin, E. V. Dorofeev, Yu. A. Dovgalyuk, N. E. Veremei, Yu. P. Mikhailovskii, V. S. Snegurov, and A. V. Snegurov</i>	
	Changes in Characteristics of Convective Clouds and Precipitation during Cloud Merging	19
	<i>G. I. Dolgikh and A. A. Plotnikov</i>	
	Peculiarities of Generation of Infragravity Waves	33
	<i>V. P. Evstigneev, D. V. Mishin, and L. P. Ostroumova</i>	
	Calculation of Precipitation as a Water Balance Component of the Sea of Azov	39
	<i>N. A. Speranskaya and T. V. Fuksova</i>	
	Long-term Changes in Main Components of Lake Khanka Water Regime	53
	<i>A. A. Sokolov and A. N. Bugaets</i>	
	To the Problem of Verification of Methods for Short-range Forecasting of Hydrological Parameters	65
	<i>I. L. Kalyuzhnyi</i>	
	General Features of Formation of Hydrochemical Regime for the Main Types of Bogs in Russia	72
COMMUNICATIONS	<i>Z. Ramak, J. Porhemmat, H. Sedghi, E. Fattahi, and M. Lashni-Zand</i>	
	The Climate Change Impact on Water Regime and Maximum Flow in a Catchment. A Case Study of the Karun River Catchment in the Shalu Bridge Site	82
	<i>D. E. Klimenko, E. S. Cherepanova, L. V. Gabova, and I. V. Shchapova</i>	
INSTRUMENTS, OBSERVATIONS, AND PROCESSING	Comparative Statistical Analysis of Rain Gage and Self-recording Rain Gage Data to Assess Characteristics of Flood-generating Precipitation in the Urals	91
	<i>G. V. Shevchenko, M. O. Khuzeeva, V. E. Yachmenev, and A. A. Shishkin</i>	
	Extreme Storms near the Kuril Islands from Data of Visual and Instrumental Observations	100
	<i>Yu. P. Perevedentsev</i>	
CRITIQUE AND BIBLIOGRAPHY	V. V. Osechkin, Russian-English Explanatory Meteorological Dictionary (El'-Print, St. Petersburg, 2018)	107
	<i>A. A. Vasil'ev</i>	
	V. N. Pryamitsyn, Russian Hydrometeorology in the Years of the World War I and Russian Civil War (1914–1921) (Dmitrii Bulanin, St. Petersburg, 2018)	108
RUSSIAN JUNIOR WATER PRIZE	Russian Junior Water Prize in 2018	109
	<i>D. V. Pozdnyakov, A. K. Gorokhov, and K. G. Gorokhov</i>	
	The Use of Google Earth Program for Studying Aquatic Flora	110
	<i>E. S. Dmitrevskaya, T. A. Krasil'nikova, and O. A. Markova</i>	
REVIEWS AND CONSULTATIONS	Environmental Pollution and Radiation Situation on the Russian Federation Territory in May 2018	116
	<i>L. N. Parshina</i>	
	Weather on the Russian Federation Territory in May 2018	122
	<i>T. V. Berezhnaya, A. D. Golubev, and L. N. Parshina</i>	
	Anomalous Hydrometeorological Phenomena on the Russian Federation Territory in May 2018	126
	<i>[A. M. Zvyagintsev], N. S. Ivanova, G. M. Kruchenitskii, I. N. Kuznetsova, V. A. Lapchenko, and V. V. Shirotov</i>	
	Ozone Content over the Russian Federation in the Second Quarter of 2018	138
CHRONICLE	G. G. Shchukin (to the 80th Birthday)	142
	50 Years to the Siberian Branch of Planeta Research Center for Space Hydrometeorology	143
	In Memory of A. M. Zvyagintsev (1945–2018)	144

## Схема оперативного краткосрочного комплексного прогноза приземной температуры и влажности воздуха

А. Н. Багров\*, Ф. Л. Быков\*, В. А. Гордин\*\*\*

*Для прогноза приземной температуры и влажности воздуха используется статистическая схема, учитывающая результаты расчета лучших прогнозных гидродинамических моделей на 3—5 сут, а также архивы прогнозов этих моделей и данных наблюдений на 2800 метеостанциях на территории России, стран Восточной Европы и Средней Азии. На выходе получаются прогнозы температуры и влажности в стандартные сроки с шагом 6 ч и экстремальной температуры с заблаговременностью от 12 до 120 ч. Точность представленного комплексного прогноза температуры в стандартные сроки за период с июля 2014 по июнь 2017 г. существенно лучше, чем у исходных гидродинамических моделей. Приведены сравнительные оценки точности прогноза экстремальной температуры с помощью предлагаемого метода, прогностической схемы “Расчет элементов погоды” и прогноза синоптиков.*

**Ключевые слова:** прогностическая модель, температура воздуха, погрешность прогноза, заблаговременность, экстремальная температура, температура точки росы.

### 1. Введение

Краткосрочный прогноз погоды приземных метеорологических величин важен для жизнедеятельности людей и функционирования многочисленных организаций, фирм и учреждений, от медицинских [10] до производящих электроэнергию [5]. Временной диапазон прогнозов от нескольких часов до нескольких суток часто позволяет принимать оперативные решения на транспорте, в строительстве, сельском хозяйстве и т. д. Для этого необходимы высокая точность и надежность поступления соответствующей прогностической информации.

Данная публикация — продолжение статей [2, 3]. Здесь предложен усовершенствованный метод комплексного прогноза срочной температуры с заблаговременностью до 120 ч, позволивший уменьшить, по сравнению с работой [2], погрешности прогноза; представлены описание алгоритмов и оценки прогнозов экстремальной температуры и температуры точки росы.

На входе комплексный прогноз принимает результаты прогнозов нескольких схем гидродинамического прогноза, заданных на сетках с разным шагом. На выходе выдается комплексный прогноз по 2800 пунктам России, стран Восточной Европы и Средней Азии; прогноз для ~280 пунктов России и Белоруссии размещается на сайте <http://method.meteorf.ru/ansambl/ansambl.html>, для 58 пунктов республик Средней Азии — на сайте <http://swfdp-ca.meteoinfo.ru/prognozy/mmforecasts>.

\* Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации.

\*\* Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”; e-mail: [vagordin@mail.ru](mailto:vagordin@mail.ru).

Для отработки предлагаемого алгоритма некоторые его параметры подбирались эмпирически, и существовало обоснованное опасение, что прогностическая схема комплексного прогноза с параметрами, оптимизированными для определенного архива (периода сравнения с наблюдениями), покажет затем худшие результаты на другом архиве (периоде). Однако авторская проверка на независимом пятимесячном архиве (июль — ноябрь 2017 г.) сомнений не подтвердила: полученные соотношения оценок ошибок разных схем сохранились.

Статьям [2, 3] предшествовали оценки систематического смещения результатов численных прогнозов и зависимости распределения этой ошибки от пространственных переменных [1].

## 2. Данные наблюдений и используемые схемы гидродинамического прогноза погоды

Измерения температуры и влажности воздуха на синоптических станциях, как известно, проводятся в психрометрической будке на высоте 2 м от поверхности земли. Так называемая срочная температура воздуха измеряется 4 или 8 раз в сутки с интервалом 6 или 3 ч, начиная со срока 0 ч ВСВ (только ~50 станций в России ведут 4-разовые наблюдения, а остальные ~1600, включая ~150 автоматических метеостанций, — 8-разовые; в последнее время многие автоматические станции переведены на ежечасные и 10-минутные измерения). Кроме того, в определенные для каждого региона России сроки [8] с помощью специальных минимальных и максимальных термометров измеряют значения минимальной и максимальной температуры воздуха за предыдущий 12-часовой интервал времени, который обычно соответствует ночи или дню.

В данной работе использованы архивные данные наблюдений за температурой воздуха (причем архивными считаются данные наблюдений за все прошедшие к моменту начала комплексного прогноза сутки). Эти наблюдения проходят контроль. Применяется повременной контроль данных на каждой станции, основанный на методе скользящего среднего [4, 7], позволяющий выявлять не только грубые, но и относительно небольшие ошибки наблюдений (до 4—5°C), особенно для станций, ведущих регулярные 8-срочные наблюдения. На основе проконтролированных срочных наблюдений температуры затем проводится контроль значений минимальной и максимальной температуры (с расчетом чтобы эти значения не сильно отклонялись от 8-разовых срочных значений; в случае 4-разовых наблюдений “окно” допустимых значений при контроле экстремальных значений температуры заметно больше). Контроль данных наблюдений температуры точки росы не проводится, исключаются только явно ошибочные значения.

Отметим, что поскольку представленный комплексный прогноз подтвердил большую точность, чем любая другая схема, его (с заблаговременностью 24 ч) целесообразно использовать и в качестве первого приближения для контроля измерений как срочной, так и экстремальной температуры, а также влажности. При таком первом приближении допустимое “окно” можно будет уменьшить.

При контроле температуры обычно бракуется ~0,1% всех наблюдений.

Для прогноза температуры воздуха с заблаговременностью от 12 до 120 ч с шагом 6 ч в схеме комплексного прогноза привлекаются результаты вычислений следующих прогностических моделей с началом счета в 0 и 12 ч ВСВ:

— UKMO (United Kingdom Meteorological Office), Великобритания ( $1^\circ$  по широте и долготе; до заблаговременности 48 ч с шагом 6 ч, далее до 120 ч с шагом 12 ч);

— NCEP (National Center for Environmental Prediction), США ( $0,5^\circ$  по широте и долготе; до заблаговременности 120 ч с шагом 6 ч);

— JMA (Japan Meteorological Agency), Япония ( $1,25^\circ$  по широте и долготе; до заблаговременности 72 ч с шагом 6 ч);

— ICON (Deutscher Wetterdienst), Германия ( $0,25^\circ$  по широте и долготе; до заблаговременности 48 ч с шагом 6 ч, далее до 120 ч с шагом 12 ч);

— COSMO-Ru7, Гидрометцентр России ( $\sim 7$  км; до заблаговременности 72 ч с шагом 6 ч);

— COSMO-Ru13, Гидрометцентр России ( $\sim 13$  км; до заблаговременности 72 ч с шагом 6 ч).

Шаг сеток по горизонтальным переменным и доступные прогнозы разной заблаговременности указаны в скобках. Первые четыре модели — глобальные, две последние — региональные. Шаг по горизонтальным переменным, используемый при расчетах в этих глобальных моделях, в несколько раз меньше. Прогностические поля иностранных глобальных моделей регулярно поступают в Гидрометцентр России в кодовых формах GRIB1 или GRIB2, их раскодируют и записывают в специальные базы данных.

Прогноз по модели COSMO-Ru7 покрывает только европейскую часть России. Как видно из описания, результаты не всех модельных прогнозов доступны для подготовки комплексного прогноза всех заблаговременностей. В некоторых случаях для восстановления необходимых полей применяется интерполяция по времени. Прогнозы некоторых других оперативных моделей Гидрометцентра России (спектральной, полулагранжевой и региональной) в комплексном прогнозе не используются, так как это не улучшает качества оценок.

Прогнозы по гидродинамической модели COSMO-Ru13 начиная с июня 2017 г. стали доступны с заблаговременностью до 120 ч.

### 3. Алгоритм комплексного прогноза срочной температуры воздуха

Опишем алгоритм комплексного прогноза в пунктах расположения синоптических станций. Далее  $t$  — время начала счета используемых прогнозов гидродинамических моделей, изменяется дискретно с шагом 12 ч;  $z$  — заблаговременность прогноза (от 6 до 120 ч с шагом 6 ч);  $i$  — номер модели. Пусть  $T_{\text{mod},i}(t, z)$  — прогноз температуры по  $i$ -й модели с момента  $t$  на момент  $t + z$ ,  $T_{\text{fact}}(t)$  — фактические значения срочной температуры в момент  $t$ .

В комплексном прогнозе применяются модельные прогнозы  $T_{\text{mod},i}(t, z)$ , рассчитанные для стартового времени  $t$  с заблаговременностью  $z$ . Для статистической коррекции результатов расчета нескольких моделей гидродинамического прогноза погоды используется архив данных наблюдений. На точку станции из точек сеток моделей производится билинейная интерполяция. При этом разность в высоте точек сетки и точки станции игнорируется.

В основу предлагаемых здесь алгоритмов положена следующая гипотеза о временных рядах ошибок прогноза исходных моделей  $T_{\text{fact}}(t+z) - T_{\text{mod},i}(t, z)$ : эти ряды есть гауссовские случайные процессы с медленно меняющимися средними значениями и дисперсиями.

В качестве периода обучения выбран период  $t_z = 25$  сут. Для каждого дня  $t - t_z \leq s \leq t$  из периода обучения  $j \leq t_z$  безразмерные веса определяют так, чтобы они убывали в геометрической прогрессии и в сумме давали единицу:

$$w(s, t, z) = \exp\left(-\lambda \frac{t-s}{1 \text{ сут}}\right) / \sum_{j=1}^{j=t_z} \exp(-\lambda j), \quad (1)$$

где  $\lambda = 0,11 \text{ сут}^{-1}$  — экспериментально подобранный коэффициент “забывания истории”, что примерно равно коэффициенту корреляции погрешностей модельных прогнозов за два соседних дня. При выборе таких  $\lambda$  и  $t_z$  дальнейшее увеличение периода обучения  $t_z$  не приведет к существенному изменению оценок вследствие малых весов при еще более давнем сроке.

Пусть  $L[x(t, z)]$  — результат сглаживания произвольной функции  $x(t, z)$  с весами  $w(s, t, z)$ :

$$L[x(t, z)] = \sum_{j=1}^{j=t_z} w(t-j, t, z) x(t-j, z).$$

С помощью оператора  $L$  оценим смещение прогнозов для  $i$ -й модели  $\mu_i(t, z)$  и дисперсии их погрешностей  $\eta_i(t, z)$ :

$$\begin{aligned} \mu_i(t, z) &= L[T_{\text{mod},i}(t, z) - T_{\text{факт}}(t+z)], \\ \eta_i(t, z) &= L[T_{\text{mod},i}(t, z) - T_{\text{факт}}(t+z) - \mu_i(t, z)]^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Оценки (2) рассчитываются для каждой станции, для каждого стартового времени  $t$  и для каждой заблаговременности  $z$ .

Пусть  $\eta_{\min}(t, z) = \min_i(\eta_i(t, z))$  — дисперсия погрешностей наиболее точной из имеющихся моделей. Модель  $i$  используется в комплексном прогнозе  $T_{\text{комп}}(t, z)$ , если выполнено неравенство

$$\eta_i(t, z) < q^2 \eta_{\min}(t, z), \quad (3)$$

т. е. модели, погрешности которых не более чем в  $q = 1,6$  раза превосходят погрешность наиболее точной модели, в комплексном прогнозе не используют. Выбор используемых моделей происходит независимо для каждого пункта и каждой заблаговременности.

Комплексный прогноз срочной температуры  $T_{\text{комп}}(t, z)$  будем вычислять по формуле, комбинирующей прогнозы на данную точку в данный момент времени по нескольким исходным гидродинамическим моделям:

$$T_{\text{комп}}(t, z) = \sum_i \frac{T_{\text{mod},i}(t, z) - \mu_i(t, z)}{\eta_i(t, z)} / \sum_i \frac{1}{\eta_i(t, z)}. \quad (4)$$

Если бы оценки (2) для смещения и дисперсии были точны, а погрешности используемых моделей — независимы (что неверно), то формула (4) давала бы наименьшую среднеквадратическую погрешность прогноза среди всех линейных формул.

Отличие алгоритма комплексного прогноза от алгоритма из работы [2] состоит в использовании весов (1), что приводит к монотонному увеличению точности прогноза с ростом обучающей выборки, а также в автоматическом отборе участвующих моделей согласно условию (3), что не приводит к уменьшению точности при добавлении в комплексный прогноз любых дополнительных моделей. По проведенным статистическим оценкам, при добавлении четвертой и последующих моделей точность алгоритма комплексного прогноза из [2] уменьшается. Напротив, при выборе участвующих в комплексном прогнозе

моделей согласно (4) точность не уменьшается при увеличении их числа по крайней мере до шести.

#### 4. Алгоритм комплексного прогноза экстремальной температуры

После того как сделан прогноз температуры в основные сроки наблюдения, перейдем к прогнозу экстремальной (максимальной и минимальной) температуры. Все дальнейшие вычисления прогноза температуры на станции проводятся последовательно в порядке увеличения заблаговременности  $z$ . Пусть  $t_m$  — момент снятия показаний с экстремального термометра на рассматриваемой станции, т. е. экстремальная температура измеряется на интервале  $(t_m - 12 \text{ ч}, t_m)$ . Выберем такие  $z_0$ , что момент времени  $t + z_0$  — один из основных сроков наблюдения (0, 6, 12, 18 ч ВСВ) и выполнено равенство  $t + z_0 + 6 \text{ ч} = t_m$  или  $t + z_0 + 3 \text{ ч} = t_m$ . Далее будем использовать следующие обозначения:  $T_{\text{fact}}^{\max}(t + z_0)$  и  $T_{\text{fact}}^{\min}(t + z_0)$  — для фактической максимальной и минимальной температуры;  $T_{\text{comp}}^{\max}(t, z_0)$  и  $T_{\text{comp}}^{\min}(t, z_0)$  — прогнозы максимальной и минимальной температуры соответственно.

Отметим, что согласно [8] на каждой станции измерение минимальной температуры должно происходить дважды: в интервалы  $(t_m - 12 \text{ ч}, t_m)$  и  $(t_m - 9 \text{ ч}, t_m + 3 \text{ ч})$ , причем если во второй интервал минимальная температура больше, чем за первый, то результат измерения может не передаваться (а может и передаваться). Если сравнивать прогноз с последним из полученных значений, то фактически нужно прогнозировать минимальную температуру за 15-часовой период  $(t_m - 12 \text{ ч}, t_m + 3)$ .

Чтобы оценить разность между экстремальной и срочной температурой (т. е. изменение температуры за неизвестный срок), будем использовать изменение температуры  $\delta T_{\text{fact}}(t + z_0) = T_{\text{fact}}(t + z_0) - T_{\text{fact}}(t + z_0 - 6 \text{ ч})$ . Нужно искать четыре коэффициента:  $0 \leq \varepsilon_{\max}(t)$ ,  $\varepsilon_{\min}(t) \leq 0,35$ ,  $\kappa_{\max}(t) \geq 0$  и  $\kappa_{\min}(t) \leq 0$ . Эти коэффициенты выбираются так, чтобы минимизировать функционалы:

$$\sum_{t_k = t - t_e - z_1}^{t - z_1} \left[ T_{\text{fact}}^{\max}(t_k) - T_{\text{fact}}(t_k) - \left\{ \kappa_{\max}(t) + \varepsilon_{\max}(t) \delta T_{\text{fact}}(t_k) \right\} \right]^2 \rightarrow \min_{\kappa_{\max}(t), \varepsilon_{\max}(t)}$$

и

$$\sum_{t_k = t - t_e - z_1}^{t - z_1} \left[ T_{\text{fact}}^{\min}(t_k) - T_{\text{fact}}(t_k) - \left\{ \kappa_{\min}(t) + \varepsilon_{\min}(t) \delta T_{\text{fact}}(t_k) \right\} \right]^2 \rightarrow \min_{\kappa_{\min}(t), \varepsilon_{\min}(t)},$$

где  $z_1 < 24 \text{ ч}$  — время, прошедшее от измерения соответствующей экстремальной температуры до начала счета гидродинамических моделей. Здесь в качестве скользящего периода обучения используется  $t_e = 15 \text{ сут}$ .

После определения для каждой станции и для каждого стартового срока  $t$  на основании фактических значений экстремальной и срочной температуры оптимальных коэффициентов  $\varepsilon_{\max}(t)$ ,  $\varepsilon_{\min}(t)$ ,  $\kappa_{\max}(t)$ ,  $\kappa_{\min}(t)$  они используются для прогноза экстремальной температуры на основе прогноза срочной. Максимальная температура вычисляется по формуле

$$T_{\text{comp}}^{\max}(t, z_0) = \max \left\{ T_{\text{comp}}(t, z_0 - 6 \text{ ч}), T_{\text{comp}}(t, z_0) + \kappa_{\max}(t) + \varepsilon_{\max}(t) [T_{\text{comp}}(t, z_0) - T_{\text{comp}}(t, z_0 - 6 \text{ ч})] \right\},$$

причем если окажется, что  $T_{\text{comp}}^{\max}(t, z_0) < T_{\text{comp}}(t, z_0 + 6 \text{ ч})$ , то выполняются дополнительные коррекции (и максимальной, и срочной температуры):

$$T_{\text{comp}}^{\text{max}}(t, z_0) \rightarrow 0,65T_{\text{comp}}^{\text{max}}(t, z_0) + 0,35T_{\text{comp}}(t, z_0 + 6 \text{ ч}),$$

$$T_{\text{comp}}(t, z_0 + 6 \text{ ч}) \rightarrow 0,25T_{\text{comp}}(t, z_0) + 0,75T_{\text{comp}}(t, z_0 + 6 \text{ ч}).$$

Прогноз минимальной температуры вычисляется по следующей формуле:

$$T_{\text{comp}}^{\text{min}}(t, z_0) = \min \{T_{\text{comp}}(t, z_0 + 6 \text{ ч}), T_{\text{comp}}(t, z_0) + \kappa_{\text{min}}(t) + \varepsilon_{\text{min}}(t) [T_{\text{comp}}(t, z_0) - T_{\text{comp}}(t, z_0 - 6 \text{ ч})]\},$$

если при этом  $T_{\text{comp}}^{\text{min}}(t, z_0) > T_{\text{comp}}(t, z_0 + 6 \text{ ч})$ , то сделаем дополнительные коррекции:

$$T_{\text{comp}}^{\text{min}}(t, z_0) \rightarrow 0,8T_{\text{comp}}^{\text{min}}(t, z_0) + 0,2T_{\text{comp}}(t, z_0 + 6 \text{ ч}),$$

$$T_{\text{comp}}(t, z_0 + 6 \text{ ч}) \rightarrow 0,35T_{\text{comp}}(t, z_0) + 0,65T_{\text{comp}}(t, z_0 + 6 \text{ ч}).$$

Отметим, что в методе комплексного прогноза  $T_{\text{comp}}^{\text{min}}(t, z_0) \leq T_{\text{comp}}(t, z_0 - 6 \text{ ч})$ , т. е. прогнозируемая минимальная температура  $T_{\text{comp}}^{\text{min}}(t, z_0)$  не выше, чем прогноз срочной температуры на 6 ч назад  $T_{\text{comp}}(t, z_0 - 6 \text{ ч})$ , а неравенство  $T_{\text{comp}}^{\text{min}}(t, z_0) \leq T_{\text{comp}}(t, z_0 + 6 \text{ ч})$ , несмотря на проводимые дополнительные коррекции в этом случае, выполнено не всегда. Для данных измерений это неравенство также выполнено не всегда: интервал измерения минимальной температуры может заканчиваться раньше — в момент  $z_0 + 3 \text{ ч}$ , а не в момент  $z_0 + 6 \text{ ч}$ .

### 5. Оценки прогноза срочной температуры

При сравнении и оптимизации прогностических схем необходим общий количественный критерий качества. В том что касается температуры, такие критерии сравнительно очевидны: средняя абсолютная или средняя квадратическая разность фактической и прогностической температуры в срок измерения:

$$ABS(z) = \frac{1}{N} \sum |T_{\text{факт}}(t+z) - T_{\text{мод},i}(t,z)|$$

или

$$RMS(z) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum |T_{\text{факт}}(t+z) - T_{\text{мод},i}(t,z)|^2},$$

где суммирование производится по множеству сроков измерения (дней) в период оценки, а для каждого дня — по множеству синоптических станций, сообщивших результаты измерений, прошедшие контроль;  $N$  — число слагаемых в сумме. В публикации ограничимся лишь первой из этих оценок, поскольку такова традиция оценки прогнозов синоптиков. Авторы полагают более информативной вторую оценку. При сравнении качества разных прогностических схем оценки обоих видов, как правило, приводят к одинаковым выводам.

Для проведения оценки прогнозов температуры территория России и прилегающих стран была разделена на две большие части:

— европейскую (ЕЧР), включая Урал, т. е. все станции в области от 43 до 71° с. ш. и от 27 до 62° в. д., кроме станций Западной Украины и Западного Казахстана, т. е. 33-й и 35-й синоптические районы;

— азиатскую (АЧР), т. е. все станции России в области восточнее 62° в. д. и от 50 до 70° с. ш. (Сибирь и Дальний Восток).

В настоящей публикации приводятся результаты для исходного срока прогнозов 0 ч ВСВ. Оценка и настройка параметров проводилась за 3-летний период с июля 2014 г. по июнь 2017 г. Для оценки качества прогнозов использовались результаты наблюдений со всех синоптических станций, расположенных на

этих территориях. В 2014—2015 гг. оценка проводилась на ЕЧР по ~680 станциям, а на АЧР — по ~690 станциям, в 2016—2017 гг. число станций увеличилось: на ЕЧР до ~800, на АЧР до ~710 (из-за введения автоматических метеостанций), поэтому были дополнительно проведены оценки на архиве за июль — ноябрь 2017 г., и эта проверка подтвердила все полученные и приведенные ниже оценки.

На рис. 1, 2 показаны осредненные по месяцам средние абсолютные ошибки прогнозов срочной температуры за рассматриваемый период для ЕЧР и АЧР с заблаговременностью 12, 24, ..., 120 ч для ЕЧР и 18, 30, ..., 114 ч для АЧР (эти заблаговременности примерно соответствуют дню и ночи на этих территориях). Комплексные прогнозы COMPL-A рассчитывались в оперативном режиме по методике [2] по всем моделям, указанным в разделе 2, кроме моделей COSMO-Ru. Прогнозы COMPL-B — неоперативный вариант, рассчитанный по

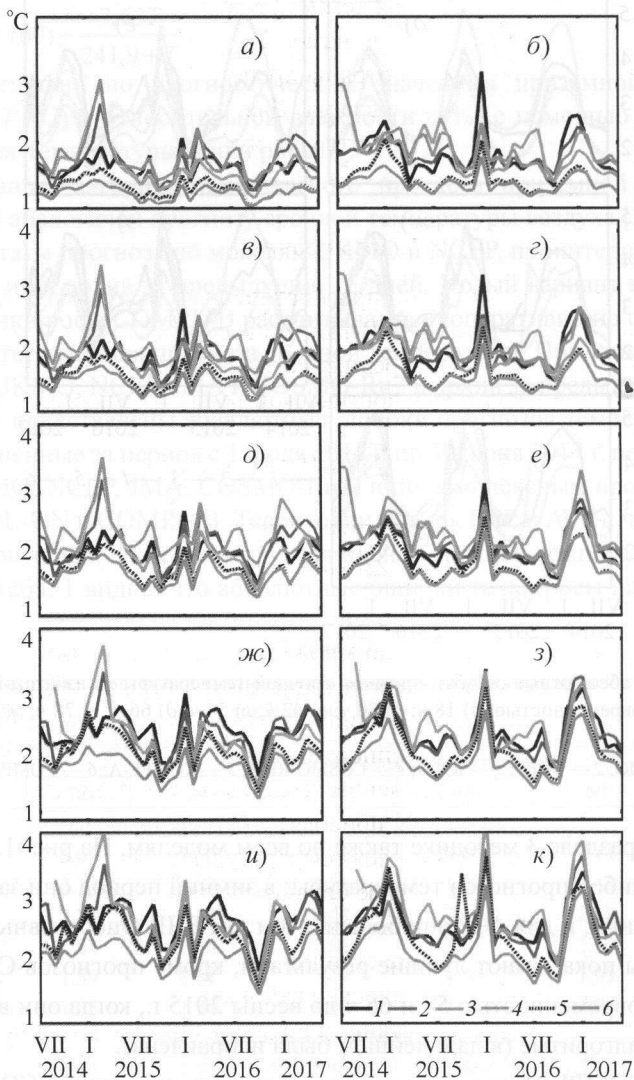


Рис. 1. Средние абсолютные ошибки прогноза срочной температуры на европейской части России с разной заблаговременностью: а) 12 ч; б) 24 ч; в) 36 ч; г) 48 ч; д) 60 ч; е) 72 ч; ж) 84 ч; з) 96 ч; и) 108 ч; к) 120 ч.

Модели: 1 — UKMO; 2 — NCEP; 3 — ICON; 4 — COSMO-Ru; 5 — COMPL-A; 6 — COMPL-B.

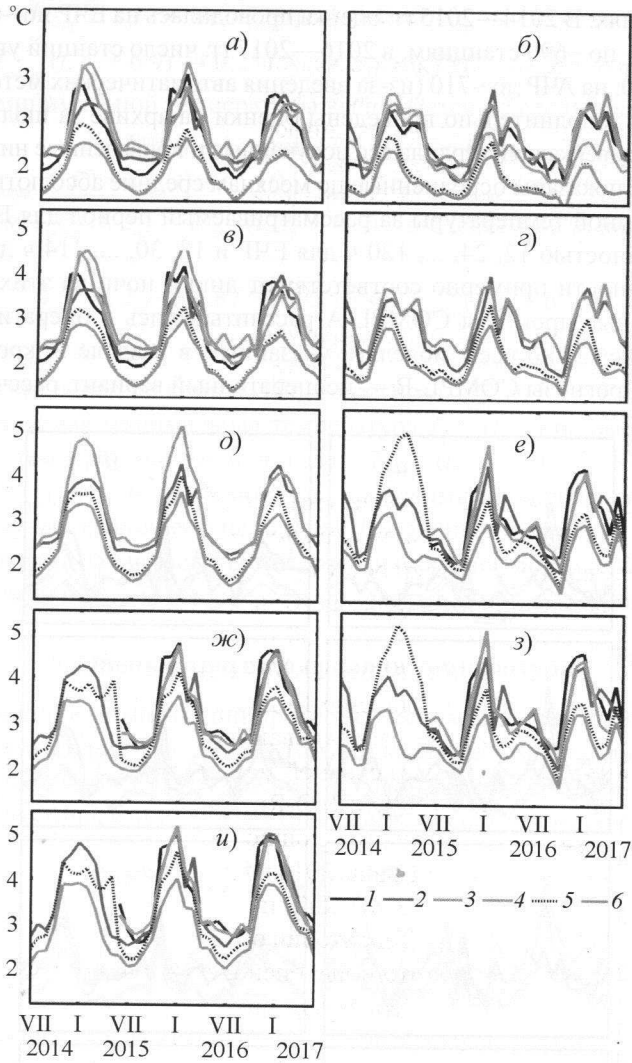


Рис. 2. Средние абсолютные ошибки прогноза срочной температуры на азиатской части России с разной заблаговременностью: а) 18 ч; б) 30 ч; в) 42 ч; г) 54 ч; д) 66 ч; е) 78 ч; ж) 90 ч; з) 102 ч; и) 114 ч.

Модели: 1 — UKMO; 2 — NCEP; 3 — ICON; 4 — COSMO-Ru13; 5 — COMPL-A; 6 — COMPL-B.

описанной в разделе 3 методике также по всем моделям. На рис. 1, 2 виден годовой ход ошибок прогнозов температуры: в зимний период они заметно больше, чем в летний, и для АЧР они больше, чем для ЕЧР. Оперативные комплексные прогнозы показывают лучшие результаты, кроме прогнозов COMPL-A на АЧР с заблаговременностью 54 и 66 ч до весны 2015 г., когда они вычислялись с ошибкой в алгоритме (в дальнейшем была исправлена).

Вариант COMPL-B имеет неизменное преимущество перед COMPL-A. Отметим, что в 2016—2017 гг. лучшие результаты среди исходных гидродинамических моделей прогнозов дает немецкая модель ICON. Оценки прогнозов JMA не приведены, так как эти оценки обычно хуже представленных на графиках.

### 6. Прогноз приземной температуры точки росы и его оценка

Предлагаемый прогноз приземной влажности воздуха может быть использован, например, при прогнозе туманов и конвективных явлений.

Синоптические станции в качестве информации о влажности воздуха передают значения температуры точки росы.

Эмпирическая формула Магнуса определяет зависимость насыщенного водяного пара от температуры:

$$E = 6,11 \cdot 10^{\frac{7,63T}{241,9+T}},$$

из которой следует формула для температуры точки росы (°C):

$$T_d = \frac{241,9B}{7,63 - B}, \tag{5}$$

где  $B = \lg(r/100) + \frac{7,63T}{241,9+T}$ .

Предварительно по прогностическим значениям приземной температуры воздуха  $T$  (°C) и относительной влажности  $r$  (%) с помощью формулы (5) сделан расчет температуры точки росы  $T_d$ .

Оперативный алгоритм комплексного прогноза приземной точки росы COMPL-UN аналогичен прогнозу срочной температуры воздуха [2]. Используются результаты прогноза по моделям UKMO и NCEP, проинтерполированные на станции, и их архив за предыдущие 15 дней. Новый вариант комплексного прогноза точки росы COMPL-B рассчитывался неоперативно по описанному в разделе 2 алгоритму для прогноза срочной температуры. При этом использованы модели UKMO, NCEP, JMA и COSMO-Ru7 и архив за предыдущие 25 дней.

В табл. 1 представлены абсолютные ошибки прогнозов температуры точки росы, осредненные за период с 1 июля 2014 г. по 30 июня 2017 г. по четырем моделям (UKMO, NCEP, JMA, COSMO-Ru7) и по комплексным прогнозам точки росы COMPL-UN и COMPL-B. Территории оценок ЕЧР и АЧР и число станций на этих территориях — те же, что и для оценок срочной температуры воздуха. Из данных табл. 1 видно, что абсолютные ошибки точки росы на АЧР почти в

Таблица 1

Абсолютные ошибки прогнозов температуры точки росы (°C, осреднение с 1 июля 2014 г. по 30 июня 2017 г.)

Модель	Заблаговременность прогнозов, ч					
	12	24	36	48	60	72
ЕЧР; ~795 станций, ~870 000 случаев						
UKMO	1,67	1,86	1,97	2,04	2,14	2,27
NCEP	2,18	1,83	2,26	1,99	2,42	2,21
JMA	2,28	2,10	2,43	2,29	2,58	2,55
COSMO-Ru7	1,84	1,80	2,05	2,03	2,34	2,34
COMPL-UN	1,59	1,61	1,74	1,76	1,93	1,99
COMPL-B	1,25	1,26	1,48	1,48	1,72	1,74
АЧР; ~700 станций, ~766 000 случаев						
UKMO	2,35	2,51	2,59	2,68	2,74	2,84
NCEP	2,95	3,06	3,05	3,17	3,20	3,34
JMA	3,11	3,26	3,24	3,39	3,40	3,56
COMPL-UN	2,07	2,22	2,24	2,36	2,39	2,54
COMPL-B	1,69	1,78	1,93	2,03	2,15	2,27

1,5 раза больше, чем на ЕЧР. Отметим, что комплексный прогноз дает заметный выигрыш по сравнению с исходными гидродинамическими моделями при прогнозе температуры точки росы, особенно вариант COMPL-B. Этот вариант был внедрен в оперативную практику в августе 2017 г.

## 7. Оценка прогнозов минимальной и максимальной температуры

Прогноз экстремальной температуры воздуха для определенного пункта — это прогноз минимальной и максимальной температуры воздуха с интервалом  $2^{\circ}\text{C}$ . Прогноз считается оправдавшимся, если фактическая экстремальная температура отстоит от середины этого интервала менее чем на  $3^{\circ}\text{C}$  [9], тогда его оправдываемость  $P = 100\%$ . Если она не укладывается в этот интервал, то  $P = 0\%$ .

В Гидрометцентре России сейчас доступны прогнозы синоптиков с заблаговременностью до 3 сут по 84 административным центрам России. Эти прогнозы составляются в региональных метеобюро и передаются в Гидрометцентр России в специальном коде КП-68, где дополнительно оцениваются (предварительно они контролируются, чтобы не допустить грубых случайных ошибок и ошибок кодировки; таких ошибок обычно очень немного).

В табл. 2 представлены оценки прогнозов, подготовленных синоптиками соответствующих УГМС за период с июля 2014 г. по июнь 2017 г., в сопоставлении с прогнозами по системе “Расчет элементов погоды” (РЭП) [6] и с двумя вариантами комплексного прогноза (КОМПЛ-А и КОМПЛ-В). Вариант КОМПЛ-А [2] и прогнозы по системе РЭП рассчитывались в оперативном режиме; прогнозы КОМПЛ-А были доступны на сайте “Комплексный прогноз”, а прогнозы РЭП — на сайте [Meteoinfo.ru](http://meteoinfo.ru). За рассматриваемый период методика расчетов КОМПЛ-А несколько раз модернизировалась. Вариант КОМПЛ-В — вышеописанный усовершенствованный вариант, разработанный в мае — июне 2017 г. Из данных табл. 2 видно, что в оперативном режиме лучшие результаты дает система РЭП, затем КОМПЛ-А и только на третьем месте оказался прог-

Таблица 2

Оценки прогнозов экстремальной температуры воздуха

Заблаговременность прогноза	Число случаев	Метод прогноза	$T_{\min}$		$T_{\max}$	
			$P, \%$	$ABC, ^{\circ}\text{C}$	$P, \%$	$ABC, ^{\circ}\text{C}$
1 сут	~84 500	КОМПЛ-В	91,4	1,35	91,3	1,32
		КОМПЛ-А	89,1	1,47	88,9	1,45
		РЭП	89,8	1,45	89,9	1,41
		Синоптики	87,9	1,57	86,7	1,62
2 сут	~72 600	КОМПЛ-В	89,2	1,48	87,2	1,54
		КОМПЛ-А	86,4	1,60	84,5	1,66
		РЭП	87,5	1,57	86,4	1,59
		Синоптики	83,8	1,77	82,3	1,83
3 сут	~72 200	КОМПЛ-В	85,6	1,66	80,9	1,86
		КОМПЛ-А	82,7	1,79	77,2	2,04
		РЭП	84,5	1,72	81,4	1,84
		Синоптики	80,1	1,95	77,9	2,04
4 сут	~86 500	КОМПЛ-В	78,4	2,02	74,5	2,19
		КОМПЛ-А	76,0	2,13	71,1	2,38

ноз синоптиков. Рассчитанный в неоперативном режиме прогноз КОМПЛ-В практически везде оказался лучше других прогнозов и лишь незначительно уступает прогнозам  $T_{\max}$  РЭП с заблаговременностью 3 сут.

Некоторое уменьшение числа оцениваемых прогнозов на вторые и третьи сутки связано с тем, что в некоторых центрах в выходные дни синоптики не дают такие прогнозы. Отметим, что синоптикам на местах доступны и прогнозы РЭП, и комплексные прогнозы, так как они заблаговременно размещаются на сайте Гидрометцентра России.

В табл. 3 представлены оценки по подвыборке, составленной из тех же прогнозов, но только по тем дням, когда на данной станции была довольно высокая активность процессов в атмосфере, что привело к межсуточной изменчивости максимальной температуры воздуха более 5°C. В этих условиях должно проявляться мастерство синоптиков. Однако если мы сопоставим результаты в табл. 2 и 3, то увидим, что во втором случае результаты всех прогнозов, как и ожидалось, ухудшились (уменьшилась оправдываемость  $P$  и увеличилась абсолютная ошибка  $ABS$ ). Но, к сожалению, оценки прогнозов синоптиков ухудшились в большей степени, чем оценки для прогнозов по системе РЭП и варианту комплексного прогноза КОМПЛ-А.

Успешность всех прогнозов экстремальной температуры воздуха существенно зависит от географического положения станции, времени года и времени суток (см. рис. 1, 2). Наибольшие ошибки во всех прогнозах обычно наблюдаются в зимний период в Восточной Сибири и на европейской части России весной при таянии снежного покрова.

Наблюдаются заметные различия в точности прогнозов срочной температуры как исходных схем и комплексного прогноза для разных регионов (подробный анализ проводился, но описание деталей значительно увеличивает объем статьи). Отметим, что, например, выигрыш комплексного прогноза по сравнению с исходными моделями особенно заметен на Северном Кавказе.

Для некоторых городов Средней Азии, расположенных высоко над уровнем моря, практически все модельные прогнозы приземной температуры имеют

Таблица 3  
Оценки прогнозов экстремальной температуры воздуха при ее фактической межсуточной изменчивости более 5°C

Заблаговременность прогноза	Число случаев	Метод прогноза	$T_{\min}$		$T_{\max}$	
			$P, \%$	$ABS, ^\circ C$	$P, \%$	$ABS, ^\circ C$
1 сут	~15 350	КОМПЛ-В	88,9	1,49	84,8	1,65
		КОМПЛ-А	84,6	1,63	80,8	1,85
		РЭП	86,4	1,62	81,6	1,82
		Синоптики	84,4	1,73	76,5	2,11
2 сут	~13 100	КОМПЛ-В	86,0	1,63	78,1	1,98
		КОМПЛ-А	82,9	1,78	74,6	2,16
		РЭП	83,4	1,78	75,4	2,10
		Синоптики	79,4	1,96	69,9	2,43
3 сут	~13 070	КОМПЛ-В	81,7	1,85	69,2	2,44
		КОМПЛ-А	78,2	2,04	66,3	2,62
		РЭП	79,7	1,95	68,3	2,48
		Синоптики	75,2	2,19	64,9	2,69
4 сут	~15 870	КОМПЛ-В	74,2	2,24	61,2	2,91
		КОМПЛ-А	71,9	2,36	58,7	3,09

очень большие систематические и средние абсолютные ошибки (до 6—8°C). Вероятно, это связано с недостаточным учетом местной орографии в этих моделях. Схема комплексного прогноза автоматически учитывает возникающие систематические ошибки и на выходе дает прогнозы с ошибкой 1,5—2°C.

Усовершенствованные варианты прогноза срочной и экстремальной температуры воздуха, соответственно COMPL-B и КОМПЛ-B, внедрены в оперативную практику с июля 2017 г.

В последнее время в Интернете появилось много сайтов, где выкладываются прогнозы погоды по пунктам с заблаговременностью до 6 сут, в том числе и прогноз  $T_{\min}$  и  $T_{\max}$ . Сотрудники Гидрометцентра России Н. А. Светлова и Е. Н. Шаколько провели сопоставление ошибок  $T_{\min}$  и  $T_{\max}$  для данных ряда сайтов за период с января 2016 г. по июнь 2017 г. для Москвы, Санкт-Петербурга и Якутска. Выборка прогностических значений  $T_{\min}$ ,  $T_{\max}$  со всех сайтов проводилась одновременно (~11 ч мск), и эти значения сопоставлялись с фактическими данными  $T_{\min}$  и  $T_{\max}$ . На рис. 3 отображены средние абсолютные ошибки этих прогнозов за полтора года. Здесь же для сопоставления показаны ошибки прогнозов КОМПЛ-B с заблаговременностью до 4 сут (если бы по этому варианту велись расчеты в этот период).

Заметим, что сайт Meteoinfo.ru — это сайт Гидрометцентра России (причем для Москвы это прогнозы синоптиков Гидрометцентра России, а для остальных городов — прогнозы по схеме РЭП [6]). Как видно на рисунках, прогнозы  $T_{\min}$  с заблаговременностью до 4 сут на сайте Meteoinfo.ru оказались на первом месте, а затем они немного уступают английскому сайту Intellicast.com. В оценках  $T_{\max}$  для всех 6 сут небольшое преимущество имеют прогнозы на сайте

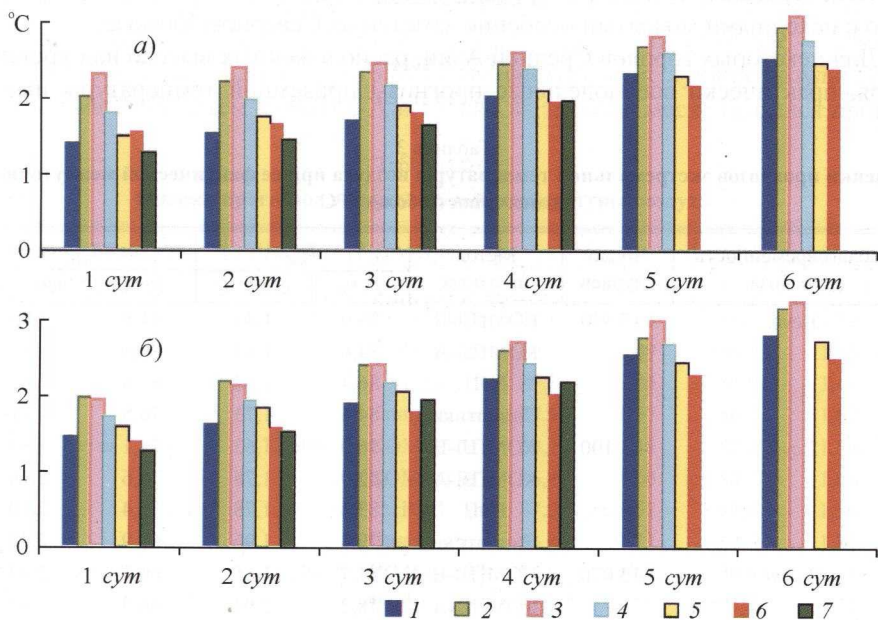


Рис. 3. Средняя абсолютная ошибка прогнозов минимальной (а) и максимальной (б) температуры по городам: Москва, Санкт-Петербург, Якутск за период 1 января 2016 г. — 30 июня 2017 г. Прогнозы сайтов: 1 — Meteoinfo.ru; 2 — Gismeteo.ru; 3 — Fobos (meteovesti.ru); 4 — Rp5.ru; 5 — Yandex.ru; 6 — Intellicast.com; 7 — КОМПЛ-B.

Intellicast.com, а Meteoinfo.ru на втором месте. Отметим, что на популярных сайтах Gismeteo.ru и meteovesti.ru (Центр погоды “Фобос”) выкладываются далеко не лучшие прогнозы  $T_{\min}$ ,  $T_{\max}$ . Наибольшие ошибки прогноза отмечаются в Якутске в зимний период (рис. 3). Сравнение показывает, что точность комплексного прогноза минимальной температуры КОМПЛ-В до 4 сут и максимальной температуры до 2 сут оказалась наилучшей, а далее она уступает только точности прогнозов сайта Intellicast.com.

Насколько авторам известно, ни один прогностический сайт, кроме сайта “Комплексный прогноз”, не приводит оценки своих прогнозов. А на этом сайте такая работа проводится для каждой станции в трех специальных “окнах”: 1) “прошедшая погода” — наряду с полезной информацией о прошедшей погоде (в том числе по месяцам за истекший год) приводятся графики прогностической (при прогнозе на ближайшие сутки) и фактической минимальной и максимальной температуры воздуха за последние 15 сут; 2) “оценки прогнозов температуры и осадков” — приводятся оценки прогнозов температуры с заблаговременностью от 12 до 120 ч с интервалом 6 ч и осадков до 72 ч за прошедший месяц; 3) “сравнительные оценки” прогнозов синоптиков, РЭП и комплексного прогноза за прошедший месяц (только для административных центров России).

## 8. Заключение

Представлены результаты комплексного прогноза срочной и экстремальной температуры воздуха и температуры точки росы. Применявшиеся здесь методы нелинейной статистической обработки временных рядов позволили получить прогнозы, погрешность которых существенно меньше, чем погрешности исходных схем. Метод работает оперативно, и его результаты доступны по ссылке <http://method.meteor.ru/ansambl/ansambl.html> и <http://swfdp-ca.meteoinfo.ru/prognozy/mmforecasts>.

Выражаем благодарность сотрудникам отдела систем информационного обеспечения Гидрометцентра России за постоянную поддержку работы с базами данных.

При подготовке статьи Ф. Л. Быков и В. А. Гордин были поддержаны грантом (проекты № 16-05-0069 и № 18-05-0011) в рамках программы “Научный фонд Национального исследовательского университета “Высшая школа экономики” (НИУ ВШЭ) 2016—2017 гг. и в 2018—2019 гг. соответственно, и в рамках государственной поддержки ведущих университетов Российской Федерации “5-100”.

## Литература

1. Алдухов О. А., Багров А. Н., Гордин В. А. Статистические характеристики прогностических метеорологических полей и их использование для объективного анализа. — Метеорология и гидрология, 2002, № 10, с. 18—33.
2. Багров А. Н., Быков Ф. Л., Гордин В. А. Комплексный прогноз приземных метеорологических величин. — Метеорология и гидрология, 2014, № 5, с. 5—16.
3. Багров А. Н., Быков Ф. Л., Гордин В. А. Схема оперативного краткосрочного комплексного прогноза ветра. — Метеорология и гидрология, 2018, № 7, с. 19—28.
4. Багров А. Н., Гордин В. А., Локтионова Е. А., Очан Н. Ю. Контроль и архивация в Росгидрометцентре глобальных данных о приземной температуре воздуха. — Метеорология и гидрология, 1993, № 2, с. 18—26.

- 5. Быков Ф. Л., Гордин В. А.** Краткосрочный прогноз часового потребления электроэнергии с учетом погоды для субъектов РФ. — Известия РАН. Энергетика, 2017, № 5, с. 47—56.
- 6. Вильфанд Р. М., Васильев П. П., Васильева Е. Л., Веселова Г. К., Горлач И. А.** Среднесрочный прогноз температуры воздуха и возникновения некоторых опасных явлений по технологии Гидрометцентра России. — Метеорология и гидрология, 2010, № 10, с. 5—14.
- 7. Гордин В. А.** Математика, компьютер, прогноз погоды и другие сценарии математической физики. — М., Физматлит, 2010, 2013.
- 8. Код** для оперативной передачи данных метеорологических наблюдений с сети станций Росгидромета. — М., Гидрометцентр России, 2013, 78 с.
- 9. Наставление** по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. Руководящий документ РД 52.27.724-2009. — Обнинск, ИГ-СОЦИН, 2009, 50 с.
- 10. Bykov P. L. and Gordin V. A.** Calls forecast for the Moscow ambulance service. The impact of weather forecast. /In: Numerical Algebra with Applications. Proceedings of Fourth China-Russia Conference. — Rostov-on-Don, Southern Federal University Publishing, 2015, pp. 17—20.

Поступила в редакцию 5 XI 2017 г., после доработки 27 XII 2017 г.

## OPERATIVE SCHEME FOR THE SHORT-RANGE COMPLEX FORECASTING OF SURFACE AIR TEMPERATURE AND HUMIDITY

A. N. Bagrov, F. L. Bykov, and V. A. Gordin

*The statistical scheme is proposed for the forecast of surface air temperature and humidity using operative weather forecasts with 3–5-day lead time from the best forecasting hydrodynamic models as well as the archives of forecasts of these models and observational data from 2800 weather stations of Russia, Eastern Europe, and Central Asia. The output of the scheme includes the forecasts of air temperature for the standard observation moments with the period of 6 hours and extreme temperatures with lead times of 12 to 120 hours. The accuracy of temperature and humidity forecasts for the period from July 2014 till June 2017 is much higher than that for the forecasts of original hydrodynamic models. The skill scores for extreme temperature forecasts based on the proposed method are compared with the similar results of the Weather Element Computation (WEC) forecasting scheme and weathermen forecasts.*

## Изменения характеристик конвективных облаков и выпадающих осадков при слиянии облаков

А. А. Синькевич\*, В. Б. Попов\*, И. А. Тарабукин\*,  
Е. В. Дорофеев\*, Ю. А. Довгальук\*, Н. Е. Веремей\*,  
Ю. П. Михайловский\*, В. С. Снегуров\*, А. В. Снегуров\*

*Представлены результаты исследования слияния конвективных облаков, которое наблюдалось вблизи Санкт-Петербурга. Проанализированы данные измерений, полученные с помощью комплекса дистанционных средств: радиолокатора, радиометра и грозопеленгатора. Использованы данные осадкомерной сети. Выполнено моделирование облаков с помощью полторамерной нестационарной модели конвективного облака. Разработана методика калибровки радиолокационных измерений характеристик осадков по данным сети осадкомеров. После слияния облаков по результатам радиолокационных измерений отмечено увеличение высоты верхней границы облака на 2 км, максимальная отражаемость от облака увеличилась на 10 дБZ, максимальная интенсивность осадков и поток осадков — примерно в 2 раза. Увеличение интенсивности осадков подтверждено также измерениями с помощью осадкомеров и результатами численного моделирования. Зафиксировано возрастание интенсивности грозových разрядов.*

**Ключевые слова:** конвективные облака, слияние облаков, интенсивность осадков, отражаемость, моделирование развития облаков.

### Введение

Слияние облаков наблюдалось при проведении самолетных исследований, а позднее — с помощью дистанционных средств изучения атмосферы. Установлено, что наиболее мощные и долгоживущие кучево-дождевые облака формируются, когда происходит слияние двух или нескольких конвективных облаков [1, 16, 30, 32]. Из-за больших размеров образовавшееся облако меньше подвергается воздействию сухого воздуха, поступающего в него вследствие процесса вовлечения, что способствует его более интенсивному развитию. Достаточно часто перед слиянием облаков наблюдается появление так называемого облачного моста — перемычки между облаками, состоящей из облаков нижнего и (или) среднего яруса [23, 32, 35]. Причиной появления облачного моста, по мнению ряда ученых, является взаимодействие нисходящих потоков, формируемых сливающимися облаками [23, 30]. Появление радиоэха в этом месте обычно объясняется переносом облачных частиц соответствующими потоками в промежуток между сливающимися облаками [36]. Слияние облаков оказывает очень сильное воздействие на их последующее развитие. Как радиолокационные исследования, так и данные численного моделирования показали увеличение площади образовавшегося облака, высоты верхней границы и радиолока-

\* Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова; e-mail: sinkevich51@mail.ru.

ционной отражаемости облака [10, 22, 23, 33, 37]. В образовавшемся облаке формируется более интенсивный восходящий поток и, соответственно, можно ожидать увеличения количества осадков по сравнению с изолированным облаком. Изменения динамики движения объемов облачного воздуха могут приводить к тому, что они будут подвержены как процессам вовлечения, так и обратным, что в дальнейшем может привести к формированию многомодального спектра облачных частиц вследствие взаимодействия новых появляющихся капель и остатков крупных облачных частиц [26]. Количество и интенсивность осадков могут изменяться в результате этих процессов.

Пока проведено мало натуральных экспериментов по исследованию изменения количества осадков при слиянии облаков. Здесь можно отметить работы американских ученых. По их данным, полученным с помощью радиолокатора, при слиянии двух облаков средних размеров наблюдается увеличение количества осадков в 10—20 раз [32]. Также было показано, что в Южной Флориде 86% осадков формируется из облаков, которые сливались, хотя на соответствующей площади 90% облаков не участвовали в процессе слияния.

Изучение процесса слияния облаков важно также для активных воздействий на облака с целью увеличения количества осадков и предотвращения града. Очень часто воздействия проводятся на фидерные облака, которые в дальнейшем сливаются с материнским облаком [5, 15, 22]. Многочисленные исследования указывают на эффективность таких работ, однако количественный эффект до настоящего времени остается не до конца изученным.

Суммируя информацию из опубликованных данных, можно утверждать, что качественный эффект слияния облаков на их характеристики и особенно на осадкообразующую способность не вызывает сомнения, однако количественные оценки были получены лишь для отдельных случаев.

Основной задачей настоящей статьи является исследование изменений характеристик конвективных облаков, интенсивности осадков и их количества при слиянии. Проанализирован случай слияния облаков, который наблюдался 3 августа 2015 г. в районе Санкт-Петербурга.

### Данные для проведения исследований

Использованы данные, полученные с помощью метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С, работающего на длине волны 5,3 см. Он установлен в п. Воейково (Ленинградская область) в 10 км восточнее Санкт-Петербурга. Радиолокатор имеет следующие основные технические характеристики: мощность в импульсе не менее 900 кВт, ширина диаграммы направленности 1°, период между радиолокационными обзорами 10 мин. Для обработки и визуализации данных ДМРЛ-С применялось программное обеспечение вторичной обработки радиолокационной информации “ГИМЕТ-2010”, обеспечивающее получение метеорологических радиолокационных продуктов с пространственным разрешением 1 км.

Интенсивность атмосферных осадков оценивалась по измерениям весовых осадкомеров Pluvio<sup>2</sup> 200. На территории Санкт-Петербурга и ближайших пригородов функционирует сеть таких осадкомеров, включающая 34 прибора, которые проводят измерения количества осадков с периодом 5 мин.

Для обнаружения грозových разрядов использовалась грозопеленгационная система “Алвес” [18].

Помимо радиолокационных данных при анализе развития облаков рассматривались также результаты измерений с помощью многоканального радиометра SEVIRI, установленного на спутнике "Meteosat" (период обзора — 15 мин).

### Методика расчета полей интенсивности осадков

Измерение интенсивности осадков из облаков по радиолокационным данным представляет собой сложную задачу, решению которой посвящено множество исследований [21, 27, 31, 34]. Трудности измерений связаны с отсутствием строгой зависимости между отражаемостью  $Z$  и интенсивностью осадков  $I$ . Аппроксимация такой зависимости была впервые получена Маршалом и Пальмером [29]:

$$Z = AI^B, \quad (1)$$

где  $Z$  — в  $\text{мм}^6/\text{м}^3$ ,  $I$  — в  $\text{мм}/\text{ч}$ .

Маршал и Пальмер использовали коэффициенты  $A = 200$  и  $B = 1,6$ . Дальнейшие исследования показали, что коэффициенты в данной формуле изменяются в зависимости от метеорологических, климатических и физико-географических условий измерений [31].

В данной работе для расчета пространственного распределения интенсивности атмосферных осадков вблизи поверхности земли использовали пространственное распределение радиолокационной отражаемости в горизонтальном сечении на высоте 1 км с разрешением  $1 \times 1$  км и с временным разрешением 10 мин, а также данные измерения количества осадков за каждые 5 мин на сети осадкомеров.

С целью повышения точности измерений характеристик осадков коэффициенты  $A$  и  $B$  в формуле (1) были получены следующим образом.

Для каждого рассматриваемого радиолокационного обзора рассчитывались значения интенсивности осадков в местах расположения pluviографов. Интенсивность вычислялась на основе измерений количества осадков pluвиографами в момент окончания радиолокационного обзора ( $P_0$ ) и через 5 мин после окончания ( $P_5$ ). Полученная сумма осадков пересчитывалась в их интенсивность, отсеивались измерения с интенсивностью осадков менее 1 мм/ч. Это было сделано для того, чтобы наиболее качественно восстановить осадки значительной интенсивности, которые характерны для конвективных облаков.

На следующем этапе восстанавливались поля интенсивности осадков по радиолокационной отражаемости для всех комбинаций коэффициентов  $A$  в диапазоне [100; 1000] с шагом 50 и  $B$  в диапазоне [0,1; 1,7] с шагом 0,05. Здесь использованы данные работы Фудзивары [25], в которой анализировалось соотношение  $Z$  и  $I$  для разных типов осадков. Авторы обобщили данные о соответствующих коэффициентах в зависимости от типов осадков. Указанные выше диапазоны коэффициентов  $A$  и  $B$  характерны для ливневых и грозовых облаков.

По полученным с помощью радиолокатора значениям отражаемости с использованием приведенных в работе Фудзивары различных коэффициентов  $A$  и  $B$  вычислялась интенсивность осадков в точках расположения pluвиографов. Для каждого измерения интенсивности осадков определялась невязка — разность между восстановленным значением интенсивности осадков  $\hat{I}_k$  и измеренным  $I_k$ :

$$\Delta I_k = \hat{I}_k - I_k. \quad (2)$$

По набору невязок для всех анализируемых в статье радиолокационных обзоров проводилась оценка среднеквадратической погрешности восстановления поля интенсивности осадков:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^N \Delta I_k^2}{N}} \quad (3)$$

По наименьшему значению RMSE выбиралась комбинация коэффициентов *A* и *B*.

В результате подбора коэффициентов было получено эмпирическое соотношение следующего вида:  $Z = 430I^{1.65}$  при  $RMSE = 7,5$ . Объем выборки составил 27 случаев. Отметим, что данное соотношение оказалось весьма близко к тому, которое было получено для Саудовской Аравии в работе [9], где исследовались мощные облака вертикального развития:  $Z = 432I^{1.52}$ .

Полученное эмпирическое соотношение использовано в настоящей работе для восстановления полей интенсивности осадков по радиолокационной отражаемости.

### Состояние атмосферы и анализ результатов радиозондирования

Синоптическая ситуация 3 августа 2015 г. в районе Санкт-Петербурга характеризовалась прохождением волны на холодном фронте первого рода в южной периферии циклона. Ветер изменялся с юго-западного на западный, имел незначительную среднюю скорость у поверхности земли — от 1 до 4 м/с с порывами до 10—14 м/с.

Вертикальное распределение температуры и температуры точки росы для анализируемого случая представлено на рис. 1. При построении траектории движения влажной частицы были приняты максимальные в рассматриваемый день значения приземной температуры (19°C) и температуры точки росы (12°C).

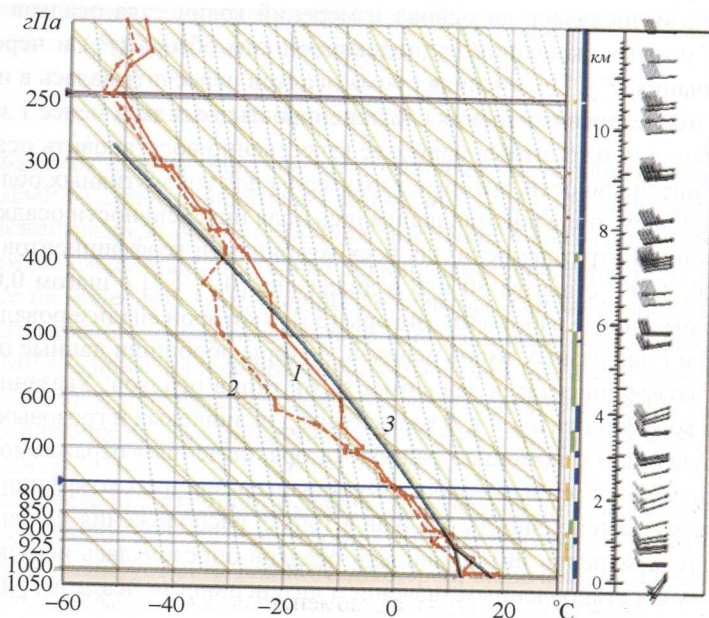


Рис. 1. Распределение температуры воздуха (1) и температуры точки росы (2) с высотой в 8 ч ВСВ 3 августа 2015 г.; 3 — кривая состояния.

Анализ данных радиозондирования показал, что в этот день в основном облакообразующем слое (900—400 гПа) наблюдалось три задерживающих слоя с нижней границей на высоте 0,9, 3,0 и 5,8 км. Запас энергии неустойчивости в слое развития конвекции (область на рисунке до уровня  $p = 460$  гПа) составил 628 Дж/кг. Такая неустойчивость считается небольшой и может приводить к развитию облаков, из которых выпадают слабые ливневые осадки. Ветер во всей толще атмосферы имел западное направление, его скорость увеличивалась с высотой. Нижняя граница облаков находилась на высоте 800 м (температура 11,2°C), высота уровня конвекции была равна 6,2 км (-22,9°C).

### Анализ развития облаков по радиолокационным измерениям и результатам радиометрического зондирования со спутника “Meteosat”

Рассматривается развитие двух кучево-дождевых облаков, которые в процессе наблюдений слились. За кучево-дождевое облако была принята радиолокационная ячейка с максимальной отражаемостью в столбе атмосферы  $Z_{\max}$  более 35 дБЗ. Объем с соответствующей отражаемостью должен был превосходить 10 км<sup>3</sup>; эта область должна была располагаться на высоте более 1 км. Слияние облаков отмечалось в период с 7 ч 40 мин по 7 ч 50 мин ВСВ. За слияние принят момент, когда две радиолокационные ячейки объединились в одну. Время, соответствующее предыдущему скану радиолокатора перед слиянием (7 ч 40 мин ВСВ), для удобства дальнейших рассуждений примем за начало отсчета “0 мин”.

Первая ячейка появилась на экране радиолокатора на -80-й минуте (6 ч 20 мин ВСВ) и просуществовала до 80-й минуты (9 ч 00 мин ВСВ). Ее развитие наблюдалось в течение 30 мин. К -50-й минуте верхняя граница облака достигла 9,8 км. Максимальная отражаемость от облака во время стадии развития наблюдалась на -60-й минуте и составила 55,5 дБЗ. В дальнейшем данное облако находилось в стадии стационарирования, разрушение началось на -10-й минуте. По данным радиолокационных наблюдений, на стадии развития облака из него выпадали осадки с интенсивностью до 44 мм/ч. Радиационная температура, измеренная радиометром SEVIRI в окне прозрачности с центром 10,8 мкм, уменьшалась от -5,8°C (-30-я минута) до -17,4°C (0 мин) (таблица). В рассматриваемых широтах размер пикселя, где осуществляется измерение радиационной температуры, превосходит 6 км и становится сопоставим с вертикальными и горизонтальными размерами облаков. Это приводит к тому, что на ранней стадии развития в поле зрения радиометра попадает не только исследуемое облако, но и участки облачности и поверхности, примыкающие к облаку. Явление параллакса также приводит к увеличению погрешности в измерении радиационной температуры облака. Все это отражено в представленных ниже результатах. По мере развития облака у него увеличивались горизонтальные размеры, соответственно уменьшались указанные погрешности измерений радиационной температуры. К 30-й минуте (уже после слияния облаков) радиационная температура уменьшилась до -27,3°C, что соответствует высоте верхней границы облака 7,2 км.

Вторая ячейка появилась на экране радиолокатора на -30-й минуте (7 ч 10 мин ВСВ) и просуществовала до момента слияния с первой. Она быстро перешла в стадию стационарирования, когда не происходило увеличение высоты верхней границы облака. Верхняя граница находилась вблизи уровня 9 км.

**Характеристики облаков по данным радиолокационных, радиометрических и грозопеленгационных измерений и по модельным расчетам**

Параметр	Время, мин									
	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	
$S, \text{ км}^2$	130/14	80/44	48/58	30/80	164	168	97	69	47	
$Z_{\text{max}}^D, \text{ дБЗ}$	50,5/41,0	49,0/55,5	46,0/51,5	44,0/48,5	54,0	52,5	58,5	52,5	47,5	
$Z_{\text{max}}^M, \text{ дБЗ}$	47,3/42,5	46,9/45,5	46,1/46,6	45/46,9	47,9	47,9	47,2	46,6	46,1	
$H_{\text{max}}^D, \text{ км}$	8,0/9,0	8,8/8,8	8,0/8,6	8,0/9,0	9,8	9,0	9,6	8,7	7,7	
$H_{\text{max}}^M, \text{ км}$	7,6/6,8	7,4/7,2	7,2/7,4	7,0/7,4	7,6	7,6	7,6	7,4	7,2	
$H_{Z_{\text{max}}}, \text{ км}$	1,1/2,0	1,0/1,1	1,0/1,0	1,1/1,3	1,2	1,0	1,1	0,7	0,9	
$I_{\text{max}}^D, \text{ мм/ч}$	29,1/7,2	23,6/58,5	15,5/33,5	12,6/22,0	47,4	38,5	89,0	38,5	19,2	
$I_{\text{max}}^M, \text{ мм/ч}$	39,5/13,3	35,1/26,9	30,0/32,7	23,1/35,1	45,4	45,4	37,5	32,7	30	
$F, \text{ м}^3/\text{с}$	324/14	172/146	101/154	43/114	338	382	337	226	90	
$T, \text{ }^\circ\text{C}$	-5,8		-17,4			-19,9	-27,3		-27,3	
$F_{\text{ALW}}, 1/10 \text{ мин}$	3/0	1/1	0/0	0/0	2	2	3	1	1	
$F_{\text{H}}, 1/10 \text{ мин}$	10/20	10/10	10/10	10/20	20	20	20	10	10	
$F_{\text{r}}, 1/10 \text{ мин}$	40/40	50/60	30/40	30/60	70	70	80	40	30	
$F_{\text{dr35}}, 1/10 \text{ мин}$	50/0	30/20	10/10	10/30	60	50	50	20	10	

Примечание. Числитель — облако Сб 1, знаменатель — облако Сб 2.

Максимальная отражаемость в этом облаке наблюдалась на -20-й минуте (55,5 дБЗ).

Отметим один важный момент, связанный с измерением высоты верхней границы облаков. По данным радиометрических измерений на 30-й минуте развития облака высота его верхней границы составила 7,2 км, радиолокационные измерения показали, что высота верхней границы к этому времени была равна 9,6 км (она оценивалась по уровню отражаемости 5 дБЗ). Анализ результатов радиозондирования показал, что высота уровня конвекции равна 6,2 км. Верхняя граница облаков может несколько превосходить уровень конвекции. Следовательно, высота верхней границы облаков, полученная по результатам радиолокационных измерений, превосходит примерно на 2 км соответствующую величину, полученную из данных аэрологического зондирования и радиометрических измерений. Это можно объяснить тем, что радиолокационные и спутниковые наблюдения имеют значительные различия в пространственном разрешении (ДМРЛ — 1 км, “Meteosat” — порядка 6 км). Также, учитывая, что отражаемость от облака в это время была достаточно велика (58,5 дБЗ), можно предположить, что значения высоты верхней границы облаков по результатам радиолокационного зондирования завышены вследствие влияния боковых лепестков диаграммы направленности антенны. Аналогичные данные были получены ранее [8].

### Слияние облаков

Рассмотрим изменения характеристик облаков вследствие слияния. Измененные характеристики облаков приведены в таблице. Анализируются радиолокационные характеристики, полученные за девять обзоров ДМРЛ-С за 1 ч 30 мин. Исследованы следующие радиолокационные характеристики облаков: максимальная отражаемость  $Z_{\text{max}}^D$ , максимальная высота верхней границы облаков  $H_{\text{max}}^D$ , высота максимальной отражаемости  $H_{Z_{\text{max}}}$ , площадь ячейки  $S$  с отражаемостью более 35 дБЗ, максимальная интенсивность осадков  $I_{\text{max}}^D$  и поток

осадков  $F$ . Поток осадков рассчитывается как интеграл от интенсивности осадков по площади конвективной ячейки:  $F = \iint I dx dy$ . Также в таблице представлены значения радиационной температуры ( $T$ ), измеренной радиометром на длине волны 10,8 мкм.

На рис. 2 показаны вертикальные радиолокационные разрезы облаков и восстановленные поля интенсивности осадков в моменты времени 0, 10 и 20 мин. Облако, которое до слияния находилось восточнее места слияния и впоследствии стало единым, обозначено как Cb 1, а то, которое находилось западнее, — как Cb 2. Во время слияния, по данным ДМРЛ, облака перемещались с запада на восток (~279°) со средней скоростью 11,8 м/с.

На рис. 2 видно, что к моменту слияния оба облака располагались достаточно близко друг к другу (на расстоянии 5 км) и давали осадки. В это время

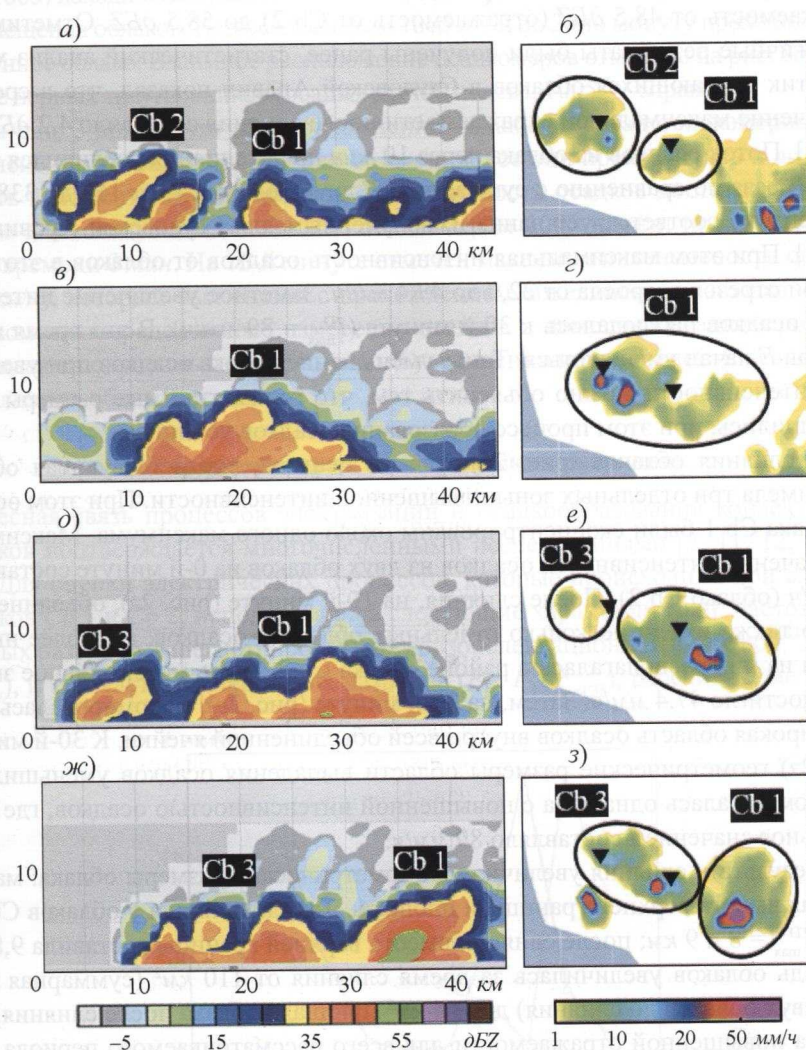


Рис. 2. Вертикальные разрезы отражаемости (а, в, д, ж) и восстановленные поля интенсивности осадков (б, з, е, з) исследуемых облаков за радиолокационные обзоры в моменты времени 0 (а, б), 10 (в, з), 20 (д, е) и 30 мин (ж, з).

На поле интенсивности осадков исследуемые облака изображены эллипсами, а осадкомеры — треугольниками.

уже наблюдалось формирование облачного моста между облаками в нижней части тропосферы (рис. 2а). Далее происходило постепенное слияние облаков, которое завершилось формированием единого облака к 30-й минуте (рис. 2ж).

Из данных таблицы следует, что значения  $Z_{\max}^D$ ,  $I_{\max}^D$  и  $F$  рассматриваемых облаков уменьшаются перед слиянием. Максимальное значение отражаемости от облака Сб 1 уменьшается от 50,5 (–30-я минута) до 44 дБЗ, а от облака Сб 2 — от 55,5 (–20-я минута) до 48,5 дБЗ. Максимальная интенсивность осадков для рассматриваемых облаков уменьшилась примерно в 2 раза. Поток осадков, формируемый облаком Сб 1, уменьшился в 7,5 раз. Таким образом, облако Сб 1 к моменту слияния уже находилось в стадии разрушения, а Сб 2 — в стадии стационарирования.

Слияние облаков резко изменило тенденцию измеряемых характеристик. Отмечается их увеличение в течение 30 мин. Резко возросла максимальная отражаемость от 48,5 дБЗ (отражаемость от Сб 2) до 58,5 дБЗ. Отметим, что аналогичные результаты были получены ранее, статистический анализ характеристик сливающихся облаков в Саудовской Аравии показал, что в среднем увеличение максимальной отражаемости после слияния составило 4,2 дБЗ [10, 28, 33]. Поток осадков из облака через 10 мин после слияния увеличился более чем в 2 раза по сравнению с суммарным  $F$  двух облаков — от 157 до 338 м<sup>3</sup>/с, что неплохо соответствует данным, полученным для Саудовской Аравии [10, 28, 33]. При этом максимальная интенсивность осадков от облаков в этот временной отрезок возросла от 22,0 до 47,4 мм/ч. Заметное увеличение интенсивности осадков наблюдалось к 30-й минуте ( $I_{\max}^D = 89$  мм/ч). В это время поток осадков  $F$  начал уменьшаться. Такое уменьшение потока осадков при увеличении интенсивности можно объяснить тем, что горизонтальные размеры Сб 1 уменьшились, при этом процесс образования осадков усилился.

До слияния облаков (рис. 2б) область осадков, соответствующая облаку Сб 2, имела три отдельных зоны повышенной интенсивности. При этом осадки из облака Сб 1 были сконцентрированы около одного максимума. Максимальное значение интенсивности осадков из двух облаков на 0-й минуте составляло 22 мм/ч (облако Сб 2). После слияния, на 10-й минуте (рис. 2г), объединенное облако также имело несколько отдельных областей осадков, наиболее интенсивная из них располагалась в районе облака Сб 2. Здесь максимальное значение  $I$  достигло 47,4 мм/ч. Затем, на 20-й минуте (рис. 2е), сформировалась единая широкая область осадков внутри всей объединенной ячейки. К 30-й минуте (рис. 2з) геометрические размеры области выпадения осадков уменьшились, при этом осталась одна зона с повышенной интенсивностью осадков, где максимальное значение  $I$  составляло 89 мм/ч.

В результате слияния увеличились геометрические размеры облака: максимальная высота верхней границы и площадь. Так, до слияния у облаков Сб 1 и Сб 2  $H_{\max}^D = 8$  и 9 км; после слияния высота верхней границы составила 9,8 км. Площадь облаков увеличилась за время слияния от 110 км<sup>2</sup> (суммарная площадь двух облаков до слияния) до 164 км<sup>2</sup> (площадь облака после слияния).

Зона повышенной отражаемости для всего рассматриваемого периода времени находилась на высоте вблизи 1 км, такое расположение зоны максимальной отражаемости, видимо, связано с отражаемостью от осадков. Исключением является –30-я минута (облако Сб 2), когда эта область находилась на высоте 2 км.

## Характеристики осадков по измерениям с помощью осадкомеров

Измерения с помощью осадкомеров позволяют делать более надежные выводы о количестве и интенсивности осадков по сравнению с радиолокационными измерениями. Однако в связи с движением облаков осадкомеры оказываются под исследуемыми облаками относительно короткий период времени, часто они располагаются не в зоне максимальной интенсивности осадков, как в данном случае.

На рис. 3 представлен временной ход интенсивности осадков по данным двух осадкомеров. Первый осадкомер (индекс 1021) до –10-й минуты находился под облаком Сб 1, затем до 0-й минуты над ним проходило облако Сб 2, после слияния осадкомер был под объединенным облаком до 20-й минуты. Второй осадкомер (индекс 1005) находился на расстоянии 11,4 км от первого осадкомера по направлению перемещения облаков. Над осадкомером 1005 с 0-й по 20-ю минуту проходило объединенное облако. Взаимное расположение осадкомеров отмечено на рис. 2б, г, е, з в виде черных треугольников (осадкомер 1021 слева, 1005 — справа).

На рис. 3 видно, что при прохождении облака Сб 1 над осадкомером 1021 интенсивность осадков достигала 16 мм/ч, далее они прекратились и возобновились в момент слияния облаков. Интенсивность осадков достигла при этом 25 мм/ч. Исследуемые облака над осадкомером 1005 начали проходить в момент времени 0 мин. На 15-й минуте отмечен максимум интенсивности осадков (25 мм/ч), который был связан с прохождением объединенного облака. Таким образом, непосредственные измерения осадков с помощью осадкомеров подтверждают полученный выше вывод об увеличении интенсивности осадков после слияния облаков.

## Характеристики электрических разрядов

Тесная связь процессов электризации и осадкообразования конвективных облаков подтверждается многочисленными исследованиями [7, 11, 12, 14, 17, 24]. Для оценки электрических процессов, которые происходили при слиянии облаков Сб 1 и Сб 2, использовались следующие характеристики: частота молниевых разрядов, зарегистрированных грозопеленгационной системой “Алвес” ( $F_{ALV}$ ), и три частоты молниевых разрядов ( $F_H$ ,  $F_Y$ ,  $F_{AV35}$ ), рассчитанные разны-

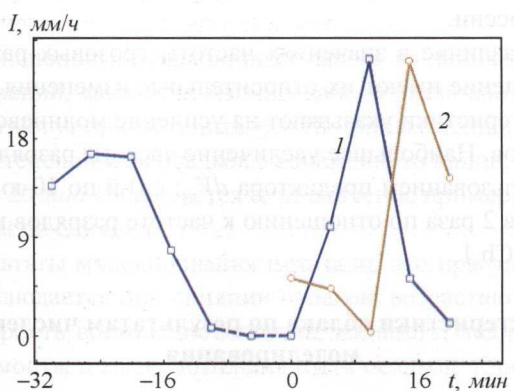


Рис. 3. Временной ход интенсивности осадков по данным осадкомеров 1021 (1) и 1005 (2). Сплошная линия — для периода, когда над осадкомером проходило облако Сб 1, штриховая — для облака Сб 2.

ми методами по радиолокационным характеристикам. Полученные параметры грозовой активности за соответствующий радиолокационный обзор пространства представлены в таблице.

Частота  $F_H$  определялась по регрессионному соотношению, широко используемому в зарубежной литературе и связывающему частоту с высотой верхней границы облака [38]:

$$F_H = 0,0000344H^{4,9}. \quad (4)$$

Верификация этого соотношения, проведенная на результатах экспериментов с грозовыми облаками Северного Кавказа, показала значительные различия расчетных частот молниевых разрядов с реально наблюдаемыми с помощью грозорегистрационной системы LS8000 [2, 17].

Частота  $F_Y$  рассчитывалась на основании соотношения, где в качестве предиктора частоты молниевых разрядов использовался так называемый критерий грозоопасности  $Y$  [6, 19]:

$$F_Y = -0,9 - 0,0003Y + 0,0046Y^2. \quad (5)$$

Соотношение (5) получено по результатам экспериментов с грозовыми облаками Северного Кавказа [17].

В самолетных исследованиях электризации конвективных облаков было показано, что максимальный коэффициент корреляции напряженности электрического поля  $E$  наблюдается с объемом переохлажденной части облака с отражаемостью более 35 дБЗ ( $dV_{35}$ ) [3, 11—13]. Представляется обоснованным использовать этот параметр в качестве предиктора частоты молний. На основании тех же экспериментальных данных [17], как и для уравнения (5), было получено следующее регрессионное уравнение:

$$F_{dV35} = -0,04 + 0,03dV_{35}. \quad (6)$$

Анализируя рассматриваемый случай слияния облаков, необходимо отметить меньшую молниевую активность, фиксируемую грозопеленгационной системой “Алвес”, по сравнению с расчетными значениями. Как видно из данных таблицы, частота молний  $F_{ALV}$ , регистрируемая системой “Алвес”, более чем в 10 раз меньше расчетных значений  $F_Y$  и  $F_{dV35}$ . Причинами столь существенных расхождений измеренных и расчетных частот молний могут являться отличающиеся технические характеристики систем “Алвес” и LS8000, а также радиолокаторов МРЛ-5 и ДМРЛ-С, разные характеристики облаков Северного Кавказа и северо-запада России.

Несмотря на различие в значениях частоты грозовых разрядов, достаточно хорошее совпадение имеют их относительные изменения. Все расчетные и измеренные характеристики указывают на усиление молниевой активности после слияния облаков. Наибольшее увеличение частоты разрядов после слияния дает метод с использованием предиктора  $dV_{35}$ : с 0-й по 10-ю минуту значение  $F_{dV35}$  увеличилось в 2 раза по отношению к частоте разрядов из облака Сб 2 и в 6 раз — из облака Сб 1.

### Характеристики облака по результатам численного моделирования

Для оценки микрофизических процессов, происходящих в облаках, использована численная нестационарная полуторамерная модель конвективного облака [4]; все процессы в данной модели рассматриваются только вдоль верти-

кальной оси, при этом изменение физических величин вдоль горизонтальных координат задается параметрическим путем.

Для расчета по модели используются профили температуры и влажности, получаемые из результатов радиозондирования атмосферы. Предполагается, что поле давления не возмущается облаком (что является упрощением). В результате расчетов получают пространственно-временной ход всех основных характеристик конвективного облака, в том числе скорости восходящего потока, водности, ледности, радиолокационной отражаемости и интенсивности осадков.

Для моделирования характеристик облака в процессе слияния за каждый из рассмотренных интервалов времени по радиолокационным измерениям рассчитывался радиус облака в допущении, что его горизонтальное сечение имеет форму окружности на уровне нижней границы. Радиус облака входит в члены уравнений модели, описывающие процессы упорядоченного втока (оттока) субстанций и турбулентного перемешивания облака с окружающей атмосферой [4, 20]. Коэффициент бокового турбулентного перемешивания задан постоянным.

В результате расчетов по модели были получены характеристики облаков за каждый исследуемый 10-минутный интервал. Максимальные значения основных смоделированных характеристик за период слияния представлены в таблице. К ним относятся радиолокационная отражаемость  $Z_{\max}^M$ , высота верхней границы облака  $H_{\max}^M$  и интенсивность осадков у земли  $I_{\max}^M$ .

В используемой модели нет возможности рассчитывать развитие двух облаков, поэтому физические эффекты, связанные со слиянием, моделировались путем увеличения радиуса облака. Из данных таблицы видно, что модельные значения максимальной радиолокационной отражаемости облаков отличаются от результатов измерений на  $-10 \dots 1,5$  дБZ. Различие весьма существенное и может быть связано с погрешностями расчета радиолокационной отражаемости в модели. В отличие от данных натуральных экспериментов, когда после слияния облаков резко увеличилась отражаемость, в модельных расчетах это увеличение незначительно.

Высота верхней границы облака по результатам моделирования меньше на 1—2 км, чем по радиолокационным данным, и соответствует той, которая получена при анализе результатов радиозондирования и по данным радиометрических измерений со спутника. Она изменяется в пределах 6,8—7,6 км в зависимости от радиуса облака, слияние облаков привело к очень небольшому ее увеличению.

Значения интенсивности осадков, полученные из данных моделирования и результатов измерений, также достаточно сильно различаются в большинстве случаев; различия могут превосходить  $\pm 100\%$ . Однако если проследить за трендом изменения интенсивности осадков во времени, то видно, что после слияния облаков в течение 20 мин наблюдается ее увеличение примерно на 30% по сравнению с моментом до слияния.

В целом результаты моделирования показали, что при увеличении радиуса облака  $R$ , что наблюдается при слиянии облаков, возрастают высота его верхней границы, скорость восходящего потока, водность, ледность и радиолокационная отражаемость, а также интенсивность осадков. Единственное исключение составляет ледность облачных кристаллов, которая достигает  $1,25$  г/кг при радиусе 3,5 км, далее несколько уменьшается. При радиусе облака более 3 км максимальные значения высоты верхней границы, скорости восходящих

потоков, ледности градин и отражаемости с ростом  $R$  перестают значительно изменяться. Указанный ход характеристик объясняется тем, что с увеличением горизонтальных размеров облака уменьшается роль его взаимодействия с окружающей средой (вовлечение, перемешивание), и процесс его эволюции становится похож на адиабатический.

### Заключение

С использованием данных измерений радиолокатора ДМРЛ-С, радиометра SEVIRI, установленного на спутнике “Meteosat”, грозопеленгационной сети “Алвес” и сети осадкомеров Pluvio<sup>2</sup> 200, а также по результатам численного моделирования с помощью нестационарной полуторамерной модели конвективного облака выполнен анализ изменения характеристик кучево-дождевых облаков в процессе их слияния в районе г. Санкт-Петербург.

Представлена усовершенствованная методика расчета полей интенсивности осадков по результатам радиолокационных измерений. Она предусматривает определение коэффициентов в уравнении Маршала — Пальмера по непосредственным измерениям интенсивности осадков с помощью наземных осадкомеров.

Установлено существенное завышение высоты верхней границы облаков по данным радиолокационных измерений по сравнению с измерениями с помощью радиометра SEVIRI и результатами расчета по полуторамерной нестационарной модели облака и по методу частицы. Основной причиной расхождений, по мнению авторов, является влияние боковых лепестков диаграммы направленности антенны.

При слиянии облаков заметно изменился временной ход исследуемых характеристик. В частности, по данным радиолокационных измерений отмечается увеличение высоты верхней границы облака на 2 км, на 10 дБЗ увеличилась максимальная отражаемость от облака, максимальная интенсивность осадков и поток осадков увеличились примерно в 2 раза. Увеличение интенсивности осадков подтверждается также измерениями осадкомеров, получено и по результатам численного моделирования. Также было зафиксировано возрастание интенсивности грозových разрядов.

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 16-05-00197\_a, 15-05-05719\_a, 17-55-80048 БРИКС\_a, 17-05-00965\_a).

### Литература

1. Абшаев М. Т. Структура и динамика развития грозо-градовых процессов Северного Кавказа. — Труды ВГИ, 1984, вып. 53, с. 6—22.
2. Аджиев А. Х., Стасенко В. Н., Тапасханов В. О. Система грозопеленгации на Северном Кавказе. — Метеорология и гидрология, 2013, № 1, с. 5—11.
3. Гальперин С. М., Михайловский Ю. П., Стасенко В. Н., Фролов В. И. Сопоставление результатов самолетных измерений напряженности электрического поля конвективных облаков с их радиолокационными характеристиками. — Труды НИЦ ДЗА (ГГО), 2005, вып. 6(554), с. 134—149.
4. Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Синькевич А. А. Применение полуторамерной модели для решения фундаментальных и прикладных задач физики облаков. Второе издание. — СПб, Моби Дик, 2013, 220 с.
5. Довгалюк Ю. А., Егоров А. Д., Станкова Е. Н. и др. Исследование процесса перехода мощного кучевого облака в кучево-дождевое после воздействий. /В сб.: Активные воздействия на гидрометеорологические

- процессы. — Л., Гидрометеоздат, 1990, с. 265—270.
6. Дорощев Е. В., Львова М. В., Попов И. Б., Тарабукин И. А. Применение критериев распознавания грозных кучево-дождевых облаков в алгоритмах вторичной обработки радиолокационной информации, получаемой с помощью метеоррадиолокаторов нового типа. — Труды ГГО, 2014, вып. 572, с. 140—153.
7. Имянитов И. М., Чубарина Е. В., Шварц Я. М. Электричество облаков. — Л., Гидрометеоздат, 1971, 93 с.
8. Краус Т. В., Синькевич А. А., Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Макитов В. С., Степаненко В. Д. Комплексное исследование характеристик кучево-дождевого облака, развивающегося над Аравийским полуостровом в условиях большого дефицита точки росы в атмосфере. Часть 1. Натурные наблюдения и численное моделирование. — Метеорология и гидрология, 2011, № 2, с. 44—59.
9. Краус Т. В., Синькевич А. А., Гхулам А. С. Измерение осадков большой интенсивности дистанционными методами. — Метеорология и гидрология, 2012, № 7, с. 15—27.
10. Краус Т. В., Синькевич А. А., Гхулам А. С. Радиолокационные исследования слияния облаков. — Метеорология и гидрология, 2012, № 9, с. 42—57.
11. Михайловский Ю. П. Методика и результаты самолетных воздействий на электризацию конвективных облаков. — Труды ГГО, 2015, вып. 577, с. 197—211.
12. Михайловский Ю. П. О верификации численных моделей конвективных облаков на основе результатов самолетных исследований электризации. — Труды ГГО, 2016, вып. 580, с. 125—138.
13. Михайловский Ю. П., Гальперин С. М., Кашлева Л. В., Степаненко В. Д. Электризация конвективных облаков в естественном цикле развития и при активных воздействиях. /В сб.: Самолетные исследования. Проблемы атмосферного электричества. — Л., Гидрометеоздат, 1990, с. 89—112.
14. Пономарев Ю. Ф., Синькевич А. А. Электризация конвективных облаков на северо-западе России. — Метеорология и гидрология, 1997, № 6, с. 73—80.
15. Синькевич А. А. Конвективные облака северо-запада России. — Л., Гидрометеоздат, 2001, 106 с.
16. Синькевич А. А., Краус Т. В., Степаненко В. Д., Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Куров А. Б., Пивоварова Л. В. Исследование динамики наковальни кучево-дождевого облака большой вертикальной протяженности. — Метеорология и гидрология, 2009, № 12, с. 5—17.
17. Синькевич А. А., Михайловский Ю. П., Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Богданов Е. В., Аджиев А. Х., Малкарова А. М., Абшаев А. М. Исследования развития грозо-градового облака. Часть 1. Развитие облака и формирование электрических разрядов. — Метеорология и гидрология, 2016, № 9, с. 27—40.
18. Снегуров А. В., Снегуров В. С. Экспериментальная грозопеленгационная система. — Труды ГГО, 2012, вып. 567, с. 188—200.
19. Степаненко В. Д., Гальперин С. М. Радиотехнические методы исследования гроз. — Л., Гидрометеоздат, 1983, 204 с.
20. Шметер С. М. Физика конвективных облаков. — Л., Гидрометеоздат, 1972, 220 с.
21. Calheiros R. V. and Zawadzki I. Reflectivity-rain rate relationship for radar hydrology in Brazil. — J. Climate Appl. Meteorol., 1987, vol. 26, pp. 118—132.
22. Changnon S. A. Effects of urban areas and echo merging on radar echo behavior. — J. Appl. Meteorol., 1976, vol. 15, pp. 561—570.
23. Danhong F. and Xueliang G. A. Cloud-resolving study on the role of cumulus merger in MCS with heavy precipitation. — Adv. Atmos. Science, 2006, vol. 23, No. 6, pp. 857—868.
24. Deierling W. and Petersen W. A. Total lightning activity as an indicator of updraft characteristics. — J. Geophys. Res., 2008, vol. 113, No. D16; doi: 10.1029/2007JD009598.
25. Fujiwara M. An analytical investigation, of the variability of size distribution of rain drops in convective storms. /In: Proceedings of the 8th Weather Radar Conference. — Boston, Amer. Meteorol. Soc., 1960.
26. Kogan Y. L. and Shapiro A. The simulation of a convective cloud in a 3D model with explicit microphysics. Part II: Dynamical and microphysical aspects of cloud merger. — J. Atmos. Sci., 1996, vol. 53, pp. 2525—2545.
27. Krajewski W. Cokriging radar-rainfall and rain-gage data. — J. Geophys. Res., 1987, vol. 92, pp. 9571—9580.
28. Krauss T. W., Sinkevich A. A., and Ghulam A. S. Effects of feeder cloud merging on storm development in Saudi Arabia. — JKAU: Met., Env. & Arid Land Agric. Sci., 2011, vol. 22, No. 2, pp. 23—39.

- 29. Marshall J. S. and Palmer W. McK.** The distribution of raindrops with size. — J. Meteorol., 1948, vol. 5, pp. 165—166.
- 30. Pozo D., Borrajero I., Marin J. C., and Raga G. B.** A numerical study of cell merger over Cuba, Part II: Sensitivity to environmental conditions. — Ann. Geophys., 2006, vol. 24, pp. 2793—2808.
- 31. Prat O. P. and Barros A. P.** Exploring the transient behavior of Z-R relationships: Implications for radar rainfall estimation. — J. Appl. Meteorol. and Climatol., 2009, vol. 48, pp. 2127—2143.
- 32. Simpson J., Westcott N. E., Clerman R. J., and Pielke R. A.** On cumulus mergers. — Arch. Meteorol. Geophys. Bioklim. A, 1980, vol. 29, pp. 1—40.
- 33. Sinkevich A. A. and Krauss T. E.** Changes in thunderstorm characteristics due to feeder cloud merging. — J. Atmos. Res., 2014, vol. 142, pp. 124—132.
- 34. Ware E. C.** Corrections to radar-estimated precipitation using observed rain gauge data. /M.S. Thesis. — Cornell University, 2005, 87 p.
- 35. Westcott N. E.** A historical perspective on cloud mergers. — Bull. Amer. Meteorol. Soc., 1984, vol. 65, pp. 219—227.
- 36. Westcott N. E.** Merging of convective clouds: Cloud initiation, bridging, and subsequent growth. — Mon. Wea. Rev., 1994, vol. 122, pp. 780—790.
- 37. Wiggert V. G., Lockett J., and Ostlund S. S.** Rainshower growth histories and variations with wind speed, echo motion, location and merger status. — Mon. Wea. Rev., 1981, vol. 109, pp. 1467—1494.
- 38. Wong J., Barth M. C., and Noone D.** Evaluating a lightning parameterization based on cloud-top height for mesoscale numerical model simulations. — Geosci. Model Dev., 2013, vol. 6, pp. 429—443.

Поступила в редакцию 22 XII 2016 г., после доработки 16 X 2017 г.

## CHANGES IN CHARACTERISTICS OF CONVECTIVE CLOUDS AND PRECIPITATION DURING CLOUD MERGING

A. A. Sin'kevich, V. B. Popov, I. A. Tarabukin, E. V. Dorofeev, Yu. A. Dovgalyuk, N. E. Veremei, Yu. P. Mikhailovskii, V. S. Snegurov, and A. V. Snegurov

*The results of investigation of convective cloud merging observed near St. Petersburg are presented. Data obtained with a set of remote sensing instruments (radar, radiometer, and lightning detector) are analyzed. Rain gage network data are used. Clouds are simulated using a 1.5-dimensional nonstationary model. A method for the calibration of radar measurements of precipitation characteristics based on rain gage network data is developed. According to radar data, a 2-km increase in cloud top height was observed after the cloud merging, maximum reflectivity of clouds increased by 10 dBZ and maximum rain intensity and rain flux increased by about two times. The increase in rainfall intensity is also corroborated by rain gage observations and numerical simulations. An increase in the intensity of lightning discharges during the merging is registered.*

## Особенности возникновения морских инфрагравитационных волн

Г. И. Долгих<sup>\*,\*\*</sup>, А. А. Плотников<sup>\*</sup>

*На основе результатов обработки и анализа экспериментальных данных, полученных с помощью лазерного измерителя вариаций гидросферного давления в бухте Витязь (Японское море), рассмотрены особенности возникновения морских инфрагравитационных шельфовых волн в диапазоне периодов от 30 с до 5 мин.*

**Ключевые слова:** инфрагравитационные морские волны, ветровые морские волны, лазерный измеритель вариаций гидросферного давления.

### Введение

Исследования инфрагравитационных волн — колебаний с периодами от 30 с до 10 мин — начали интенсивно проводиться во время Второй мировой войны, когда в некоторых портах и гаванях обнаружилась сильная подвижка судов, пришвартованных у причалов. Это явление, получившее название тягун, связано с движением масс воды во внутренней акватории. Его связь с ветровым волнением и зыбью, а самое главное — совпадение периодов тягуна и инфрагравитационных волн, натолкнули на мысль, что это родственные процессы. Было установлено, что совпадение периодов инфрагравитационных волн и периодов собственных колебаний акваторий и вызывает тягун. Именно прикладные проблемы, связанные с явлением тягуна, а также новые возможности, появившиеся в результате совершенствования измерительной техники, дали импульс изучению волновых движений в этом диапазоне периодов [8].

Исследования Манка [11, 12], Таккера [15], Йошиды [16] показали, что инфрагравитационные волны могут образовываться как при отражении от берега, так и в открытом океане в результате нелинейного взаимодействия коротких волн (ветровых и зыби); была установлена пропорциональность высоты инфрагравитационных волн и высоты ветровых волн, их породивших. Влияние инфрагравитационных волн на такие явления, как “разрывные течения” и формирование волновых нагонов, а также на формирование разнообразных ритмических береговых и прибрежных форм рельефа привело к тому, что в настоящее время изучению этих волн уделяется большое внимание.

С появлением новой широкополосной измерительной техники стало возможным более тщательное исследование свойств инфрагравитационных волн. Большинство подобных работ проводится в прибрежной или в прибойной зоне.

<sup>\*</sup> Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук.

<sup>\*\*</sup> Дальневосточный федеральный университет; e-mail: dolgikh@poi.dvo.ru.

Установлена тесная взаимосвязь пространственных свойств инфрагравитационных волн и направления распространения волн зыби. Показано, что уровень энергии инфрагравитационных волн зависит от географических условий.

Морские инфрагравитационные волны трансформируются в упругие колебания земной коры, что показано в теоретических и экспериментальных работах [6, 7, 17]. Некоторые исследователи связывают происхождение данных волн также с вариациями атмосферного давления [10, 13, 14], которые играют большую роль в возбуждении морских внутренних волн [2]. После проведения многочисленных исследований остаются открытыми некоторые вопросы: какие ветровые волны возбуждают инфрагравитационные волны, есть ли зависимость от периодов ветровых волн, каков механизм возбуждения инфрагравитационных волн и существует ли зависимость вариаций основных параметров инфрагравитационных волн (период и амплитуда) от вариаций периодов и амплитуд ветровых волн? В данной статье предпринята попытка найти ответы на эти вопросы на основе результатов обработки и интерпретации экспериментальных данных.

### Эксперимент. Обработка и анализ экспериментальных данных

В течение длительного времени в 2010 г. в бухте Витязь (Японское море) работал лазерный измеритель вариаций гидросферного давления, подробно описанный в работах [4, 9]. Его технические характеристики позволяют проводить измерения вариаций гидросферного давления в частотном диапазоне от 0 (условно) до 1000 Гц с точностью до 1 мПа. Лазерный измеритель вариаций гидросферного давления был установлен на дне бухты Витязь на глубине 8 м, что позволяло измерять вариации гидросферного давления, вызванные различными гидрофизическими процессами, среди которых в первую очередь интересны ветровые волны, инфрагравитационные морские волны, собственные колебания бухты Витязь и приливы (последние рассматривались лишь в свете их возможного воздействия на ветровые и инфрагравитационные волны). Результаты измерений по кабельным линиям поступали в лабораторный центр, где после предварительной обработки записывались в базу экспериментальных данных и в дальнейшем были подвергнуты окончательной обработке по следующей схеме: 1) фильтрация низкочастотным фильтром Хэмминга до граничной частоты 1 Гц, 2) прореживание (децимация) до граничной частоты 2 Гц (частота Найквиста), 3) спектральная обработка с выводом полученной информации в виде динамической спектрограммы, в которой по оси абсцисс представлено время, по оси ординат — частота (или период). После обработки для дальнейшего анализа были выбраны следующие временные ряды результатов измерений в 2010 г.: 8—14 мая, 9—19 августа, 1—11 сентября.

При спектральной обработке полученных экспериментальных данных практически всегда выделяются максимумы, вызванные суточным и полусуточным приливами, собственными колебаниями бухты Витязь (сейши), ветровыми волнами в диапазоне периодов от 2 до 18 с, а также инфрагравитационными морскими волнами, которые подробно будут рассмотрены далее. В некоторых записях присутствуют колебания уровня моря, вызванные нагонными явлениями, вариациями атмосферного давления и высокочастотными шумами, обусловленными движущимися искусственными объектами, а также процессами,

связанными с возникновением такого явления, как “голос моря”. Ветровые волны с периодами от 2 до 4—5 с являются региональными для бухты Витязь и возбуждаются местным ветром, который дует с берега (северо-запад, север, северо-восток) или вдоль бухты (запад, восток). В исключительных случаях периоды таких волн могут достигать 6—8 с при продолжительном воздействии ветра со скоростью 17—20 м/с. Ветровые волны с периодами от 5—6 до 14—15 с заходят в бухту с открытой части Японского моря (они возбуждаются проходящими циклонами и тайфунами). Поскольку лазерный измеритель вариаций гидросферного давления находится на дне, зарегистрированное давление, вызванное ветровым волнением, должно описываться следующим уравнением:

$$P = \frac{\rho g a}{\operatorname{ch}(kh)},$$

где  $P$  — давление;  $\rho$  — плотность;  $a$  — амплитуда ветровой волны;  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число;  $\lambda$  — длина волны;  $h$  — глубина моря. Как видно из этого выражения, величина регистрируемого давления зависит не только от параметров ветровых волн, но и от вариаций уровня моря, вызванных разными процессами. Кроме того, оно должно быть промодулировано приливами, что и наблюдается при анализе динамической спектрограммы (рис. 1а). По величине вариаций амплитуды зарегистрированных ветровых волн можно довольно точно оценить период и амплитуду приливных составляющих. В этом случае можно говорить о параметрическом методе, а не о прямом методе определения характеристик приливных составляющих, хотя лазерный измеритель вариаций гидросферного давления напрямую регистрирует вариации уровня моря, вызванные приливами. На рис. 1а также видно, что периоды ветровых волн со временем изменяются от минимального значения 4 с до максимального 9,6 с. При этом максимальная амплитуда отмечается на периоде примерно 8 с. Данное изменение свидетельствует о том, что наблюдается развитие ветрового волнения, а не волны, пришедшие из другого района Японского моря, т. е. регистрируемые ветровые волны возбуждаются вблизи зоны расположения лазерного измерителя вариаций гидросферного давления. На рис. 1а видна дискретная структура регистрируемых ветровых волн, хотя максимальная амплитуда со временем переходит от минимального периода почти до максимального.

При спектральной обработке данных лазерного измерителя вариаций гидросферного давления в диапазоне периодов от 30 с до 5 мин выделяются группы колебаний с устойчивыми максимумами на периодах порядка 46 с, 1 мин 20 с и 2 мин 40 с (рис. 1б), которые относятся к спектру инфрагравитационных морских волн.

Установлено, что выделенные группы инфрагравитационных морских волн существуют практически всегда при любом ветровом волнении, т. е. при местном ветровом волнении, возникшем в бухте, и при ветровом волнении, пришедшем с открытой части Японского моря. Амплитуды этих колебаний все время изменяются и имеют максимумы на участках, на которых происходит усиление амплитуд колебаний с периодами от 5 до 14 с. То есть приход в бухту Витязь зыби из открытой части Японского моря усиливает колебания с периодами 2 мин 40 с, 1 мин 20 с и 46 с. Во временном интервале, в котором амплитуда колебаний, лежащих в диапазоне ветровых волн и зыби, увеличивается, возрастает также и амплитуда колебаний в диапазоне от 30 с до 5 мин (т. е. 2 мин 40 с, 1 мин 20 с, 46 с). Интересным является тот факт, что наиболее усиливают

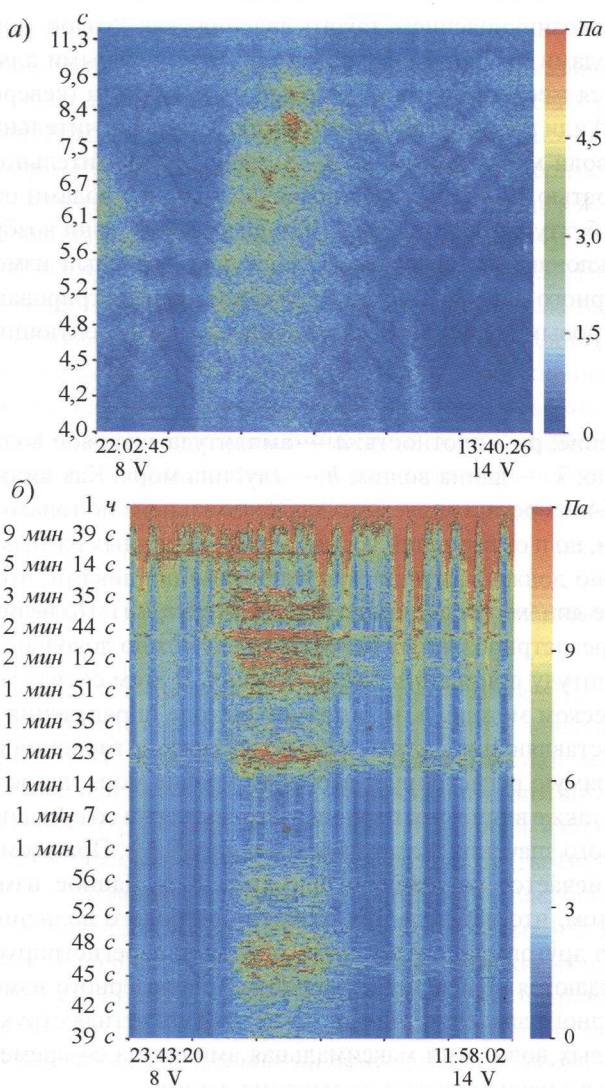


Рис. 1. Динамическая спектрограмма участка записи лазерного измерителя вариаций гидросферного давления в диапазоне морских ветровых волн (а) и в диапазоне инфрагравитационных морских волн (б), 8—14 мая 2010 г., бухта Витязь (Японское море).

амплитуду исследуемых колебаний волны, у которых со временем существенно изменяется период. Выделенные колебания (см. рис. 1б), в отличие от поверхностных ветровых волн, не испытывают вариаций, вызванных приливными составляющими. Давление, вызванное выделенными колебаниями и регистрируемое лазерным измерителем вариаций гидросферного давления, не зависит от величины водного столба в месте расположения регистратора. Таким образом, можно утверждать, что выделенные колебания относятся к стоячим волнам, для которых в фиксированный момент времени создаваемое ими давление на любой глубине от поверхности моря до дна будет одинаковым.

Как видно на рис. 1б, группа максимумов с центральным максимумом с периодом 2 мин 40 с и с наибольшей амплитудой имеет дискретную структуру, связанную с модуляционным воздействием более низкочастотных колебаний, существующих в бухте. Данный результат демонстрируется на рис. 2, на кото-

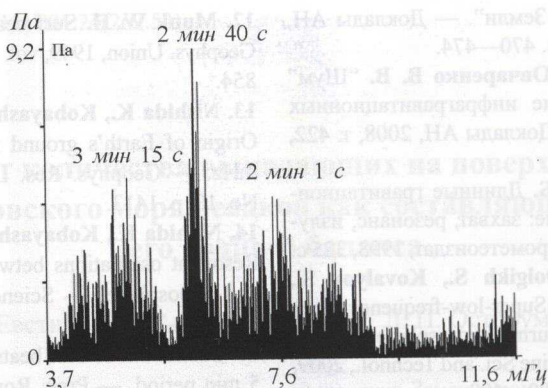


Рис. 2. Спектр участка записи лазерного измерителя вариаций гидросферного давления.

ром приведен спектр, полученный при обработке одного участка записи лазерного измерителя вариаций гидросферного давления. На рис. 2 так же, как и на рис. 1б, слева и справа относительно главного максимума выделяются “боковые лепестки”, вызванные модуляционным воздействием более низкочастотного колебания с периодом около 17 мин, который относится к основной моде собственных колебаний (сейшам) бухты Витязь [3, 5].

### Заключение

В ходе длительных экспериментальных исследований установлено, что поверхностные ветровые волны в бухте Витязь шельфа Японского моря возбуждают группу инфрагравитационных стоячих волн с периодами 2 мин 40 с, 1 мин 20 с и 46 с, амплитуда которых зависит от степени изменения периодов ветровых морских волн; они имеют устойчивую дискретную структуру, периоды колебаний практически не меняются со временем; выделенные инфрагравитационные колебания промодулированы основной модой собственных колебаний бухты Витязь.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФ (соглашение № 14-50-00034, проведение экспериментальных исследований) и программы “Дальний Восток”.

### Литература

1. Алексеев А. В., Валентин Д. И., Долгих Г. И. и др. Регистрация инфрагравитационных волн на границе “гидросфера — литосфера” береговым лазерным деформографом. — Доклады АН, 2003, т. 389, № 2, с. 244—246.
2. Долгих Г. И., Будрин С. С., Долгих С. Г. и др. Морские внутренние волны и атмосферные депрессии. — Доклады АН, 2015, т. 462, № 5, с. 601—604.
3. Долгих Г. И., Будрин С. С., Долгих С. Г. и др. Собственные колебания уровня воды в бухтах залива Посьета Японского моря. —
4. Долгих Г. И., Долгих С. Г., Ковалев С. Н. и др. Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы. — Приборы и техника эксперимента, 2005, № 6, с. 137—138.
5. Долгих Г. И., Долгих С. Г., Смирнов С. В. и др. Инфразвуковые колебания Японского моря. — Доклады АН, 2011, т. 441, № 1, с. 98—102.
6. Долгих Г. И., Долгих С. Г., Чупин В. А., Юй-Хунг Хсяю. О природе “инфраграви-

тационного шума Земли”. — Доклады АН, 2016, т. 471, № 4, с. 470—474.

7. Долгих Г. И., Овчаренко В. В. “Шум” Земли в диапазоне инфрагравитационных морских волн. — Доклады АН, 2008, т. 422, № 2, с. 250—253.

8. Рабинович А. Б. Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. — СПб, Гидрометеоздат, 1993, 325 с.

9. Dolgikh G., Dolgikh S., Kovalyov S., Chupin V., et al. Super-low-frequency laser instrument for measuring hydrosphere pressure variations. — J. Marine Sci. and Technol., 2009, vol. 14, No. 4, pp. 480—488.

10. Kobayashi N. and Nishida K. Continuous excitation of planetary free oscillations by atmospheric disturbances. — Nature, 1998, vol. 395, pp. 357—360.

11. Munk W. H. Long ocean waves. /In: The Sea. Ideas and Observations on Progress in the Study of the Sea. — New York, J. Wiley, 1962, pp. 647—663.

12. Munk W. H. Surf beats. — Trans. Amer. Geophys. Union, 1949, vol. 30, No. 6, pp. 849—854.

13. Nishida K., Kobayashi N., and Fukao Y. Origin of Earth’s ground noise from 2 to 20 mHz. — Geophys. Res. Lett., 2002, vol. 29, No. 10, p. 1413.

14. Nishida K., Kobayashi N., and Fukao Y. Resonant oscillations between the solid Earth and atmosphere. — Science, 2000, vol. 287, pp. 2244—2246.

15. Tucker M. J. Surf beats: Sea waves of 1 to 5 min period. — Proc. Roy. London A, 1950, vol. 202, No. 1071, pp. 565—573.

16. Yoshida K. On the ocean wave spectrum with spatial reference to the beat phenomena and the 1—3 minute waves. — J. Oceanogr. Soc. Japan, 1950, vol. 6, No. 2, pp. 49—56.

17. Webb Spahr C. The Earth’s “hum” is driven by ocean waves over the continental shelves. — Nature, 2007, vol. 445, pp. 754—756.

Поступила в редакцию 28 VIII 2017 г., после доработки 24 X 2017 г.

## PECULIARITIES OF GENERATION OF INFRAGRAVITY WAVES

G. I. Dolgikh and A. A. Plotnikov

*The peculiarities of the generation of infragravity sea waves with the periods from 30 s to 5 minutes are identified by the processing and analysis of experimental data obtained with the laser meter of hydrosphere pressure variations in the Vityaz’ Bay (the Sea of Japan).*

## Расчет количества выпадающих на поверхность Азовского моря осадков как составляющей его водного баланса

В. П. Евстигнеев<sup>\*,\*\*</sup>, Д. В. Мишин<sup>\*\*\*</sup>, Л. П. Остроумова<sup>\*\*\*</sup>

*На основе данных спутникового зондирования Земли с помощью радиометра SEVIRI построена статистическая модель пространственной связанности поля осадков над акваторией Азовского моря. Определен набор из четырех локаций поля для восстановления интегрального слоя осадков над морем. Установлено, что модель может применяться при водно-балансовых исследованиях Азовского моря с использованием данных береговых метеорологических станций.*

**Ключевые слова:** слой осадков, статистические методы, Азовское море, SEVIRI, сеть метеорологических станций, водный баланс, корректировка измерений осадков.

### Введение

Осадки являются важнейшей составляющей водного баланса рек, водоемов, внутренних морей. Оценка слоя осадков представляет собой нестандартную задачу, поскольку не существует информации о том, насколько точечные измерения, проводимые на сети метеорологических станций, отражают истинную динамику выпадения осадков над водными акваториями. Большая изменчивость количества и интенсивности осадков в пространстве и времени существенно ограничивает использование многолетних данных наземной сети метеорологических станций и локаторов из-за недостаточной ее плотности. Альтернативой могут служить данные пассивного зондирования земной поверхности с орбиты геостационарных спутников, что обеспечивает охват больших территорий и разных по интенсивности процессов формирования осадков [22]. Однако ряды спутниковых данных об осадках не обладают достаточной продолжительностью для ретроспективного анализа составляющих водного баланса водных объектов. Тем не менее при решении этой задачи использовать их возможно.

Целью авторов настоящей работы была разработка статистической модели пространственной связанности поля осадков над акваторией Азовского моря на основе данных дистанционного зондирования Земли. Основанием служила гипотеза о том, что пространственная связь, установленная по данным спутникового зондирования между отдельными локальными точками и интегральной характеристикой над акваторией моря, отражает объективную связанность

\* Севастопольский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

\*\* Севастопольский государственный университет; e-mail: vald\_e@rambler.ru.

\*\*\* Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова; e-mail: miwindv@gmail.com, lostroumova@mail.ru.

поля осадков. В случае справедливости гипотезы уравнение связи, выведенное по данным дистанционного зондирования, можно применять при водно-балансовых расчетах с использованием данных метеорологических измерений.

### Материалы исследования

В последнее десятилетие получили развитие алгоритмы извлечения данных о характеристиках осадков на основе зондирования земной поверхности радиометрами SSM/I, SEVIRI и др. [18]. Причем эти алгоритмы предполагают привлечение дополнительной информации об оптических и микрофизических параметрах облаков [4, 16, 19], позволяющих различать облачность с высокой оптической плотностью и большим эффективным радиусом частиц, для которой высока вероятность выпадения осадков большой интенсивности.

В статье использованы данные о суточной сумме осадков, рассчитанные по данным сенсора SEVIRI, размещенного на европейском геостационарном спутнике “Meteosat” второго поколения (MSG-2). Радиометр проводит сканирование земной поверхности каждые 15 мин и регистрирует уходящее излучение в 12 спектральных каналах в видимой и инфракрасной областях [19]. Пространственное разрешение SEVIRI в надире для канала высокого разрешения составляет  $1 \times 1$  км и для остальных каналов —  $3 \times 3$  км. Для пересчета данных SEVIRI в суточные суммы осадков использован алгоритм, предложенный в работе [17]. Полученные таким способом данные были предоставлены ФГБУ “НИЦ “Планета” для выполнения исследования, результаты которого приведены в настоящей статье. Данные радиометра SEVIRI охватывали период с 1 января 2013 г. по 2 сентября 2015 г. с отдельными перерывами (всего 941 запись) и представлены в пространственном секторе  $40,8\text{—}47,5^\circ$  с. ш. и  $32\text{—}43^\circ$  в. д. (Азовское море и восточная часть Черного моря). Целевым показателем служило значение слоя осадков над Азовским морем, поэтому дополнительно потребовалось провести отбор данных только для акватории моря (рис. 1). Под слоем понимается количество осадков, выпавших на поверхность акватории за какой-либо интервал времени, равное толщине слоя в миллиметрах, равномерно распределенного по площади этой акватории. Этот термин используется в литературе, посвященной изучению и расчету водного баланса разных водных объектов [8].

Следует отметить, что оценка осадков с использованием сенсора SEVIRI является не прямым их измерением, а косвенным, полученным путем параметризации отдельных микрофизических и оптических параметров облаков и классификации информации, поступающей со спутника, а также сопутствующих метеорологических данных [4, 5]. Поэтому валидация оценочных значений количества осадков SEVIRI по-прежнему проводится по данным прямых измерений осадков на сети метеорологических станций. На рис. 1 приведено положение береговых станций на Азовском море, их характеристики представлены в таблице. К сожалению, доступные массивы данных метеорологических наблюдений не позволяют провести сравнение результатов прямых и спутниковых наблюдений. Однако можно сослаться на работу [4], где по данным 48 метеорологических станций, расположенных на юге европейской части России, установлено удовлетворительное согласование данных SEVIRI/AVHRR с результатами прямых измерений суточного количества осадков на станциях. Кроме того, в работе [4] отмечено неплохое согласование пространственно осредненных характеристик осадков, чем обусловлено их использование авторами настоящей статьи.

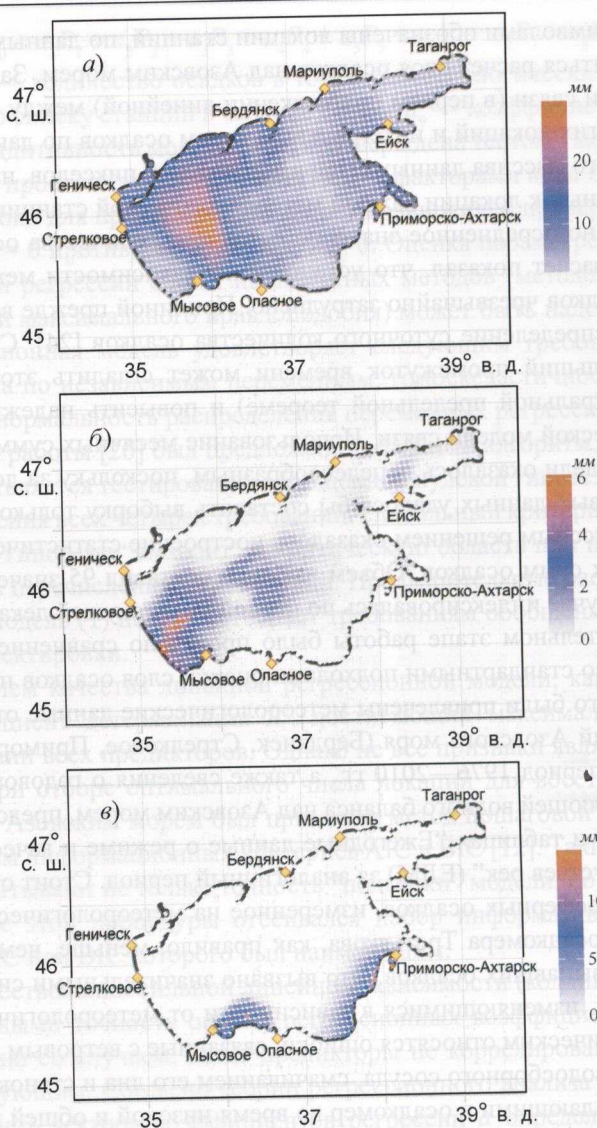


Рис. 1. Примеры данных радиометра SEVIRI о суточном количестве осадков над акваторией Азовского моря в разные даты: а) 25 июня 2015 г.; б) 5 июня 2013 г.; в) 25 мая 2014 г.

**Пункты наблюдения гидрометеорологической сети на Азовском море**

Номер станции	Станция	Код	Широта, град с.	Долгота, град в.	Высота, м
1	Мариуполь	34712	47,0	37,5	8
2	Бердянск	34717	46,8	36,7	2
3	Мысовое	33981	45,5	35,9	15
4	Геническ	33910	46,17	34,82	15
5	Стрелковое	33961	45,9	34,9	4
6	Таганрог	34720	47,2	38,9	30
7	Ейск	34727	46,8	38,3	3
8	Приморско-Ахтарск	34824	46,03	38,15	3
9	Опасное	33986	45,4	36,6	2

На рис. 1 символами обозначены локации станций, по данным которых может производиться расчет слоя осадков над Азовским морем. Задача состояла в установлении связи (в первом приближении линейной) между оптимальным количеством этих локаций и интегральным слоем осадков по данным SEVIRI. Из спутникового массива данных были выбраны по 9 пикселей, наиболее близко расположенных к локации каждой метеорологической станции, по которым было рассчитано осредненное значение суточного количества осадков. Предварительный расчет показал, что установление зависимости между суточными слоями осадков чрезвычайно затруднено. Причиной прежде всего является негауссово распределение суточного количества осадков [24]. Суммирование осадков за большой промежуток времени может сгладить этот недостаток (согласно центральной предельной теореме) и повысить надежность линейной статистической модели связи. Использование месячных сумм осадков для построения модели оказалось нецелесообразным, поскольку за доступный период спутниковых данных удалось бы составить выборку только из 33 значений. Компромиссным решением оказалось построение статистической модели связи декадных сумм осадков. Объем выборки составил 95 значений. Каждая карта в этом случае индексировалась по первой дате текущей декады.

На заключительном этапе работы было проведено сравнение результатов новой модели со стандартными подходами оценки слоя осадков над Азовским морем. Для этого были привлечены метеорологические данные отдельных береговых станций Азовского моря (Бердянск, Стрелковое, Приморско-Ахтарск и Опасное) за период 1976—2010 гг., а также сведения о годовом слое осадков как составляющей водного баланса над Азовским морем, представленные в монографии [7] и таблицах “Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек” (ЕДМ) за аналогичный период. Стоит отметить, что количество атмосферных осадков, измеренное на метеорологических станциях с помощью осадкомера Третьякова, как правило, меньше, чем количество действительно выпавших осадков. Это вызвано значительными систематическими ошибками, изменяющимися в зависимости от метеорологических условий. К систематическим относятся ошибки, связанные с ветровым недоучетом, испарением из водосборного сосуда, смачиванием его дна и стенок, “ложными осадками”, попадающими в осадкомер во время низовой и общей метели [10]. Попытка оценить суммарную поправку к измеренным величинам была реализована путем создания специальных методик корректировки, среди которых особое место занимают методы ГГО — КазНИИ [3] и ГГИ — ГГО [1]. Сравнение этих методов и оценка эффективности их применения выполнены авторами работы [10]. В настоящем исследовании при расчете действительного слоя осадков по данным метеорологических станций проводили предварительную корректировку измеренных величин по методу ГГО — КазНИИ [3].

Все расчеты, включая статистические тесты и оценку параметров множественной линейной регрессии, были произведены в среде статистического программирования R [21], в которой также был реализован алгоритм внесения поправок в исходные материалы наблюдений за осадками.

### Методика построения множественной регрессии

В первом приближении рассматривалась множественная линейная зависимость слоя осадков над Азовским морем  $P_{\text{Азов}}$  следующего вида:

$$P_{\text{Азов}} = a_0 + a_1 P_1 + a_2 P_2 + a_3 P_3 + a_4 P_4 + a_5 P_5 + a_6 P_6 + a_7 P_7 + a_8 P_8 + a_9 P_9, \quad (1)$$

где  $P_1, \dots, P_9$  — количество осадков в точках метеорологических станций (нумерация — по списку станций в таблице);  $a_1, \dots, a_9$  — коэффициенты уравнения регрессии. Аддитивность модели была подтверждена тестом Тьюки, проверяющим наличие простого взаимодействия между факторами вида  $Ga_j$  ( $i \neq j$ ) [11]. Критерий Тьюки для проверки аддитивности равносителен проверке нулевой гипотезы  $H_0: G = 0$  против альтернативы  $G \neq 0$ . Оценка параметров множественной линейной регрессии одним из известных методов (методом наименьших квадратов или максимального правдоподобия) может быть надежной, в случае если регрессионная модель удовлетворяет следующим требованиям: линейность отклика по независимым переменным; гомоскедастичность; некоррелированность; нормальность распределения переменных регрессии.

Авторами работы [20] был предложен глобальный алгоритм, в рамках которого осуществляется тестирование обобщенной нулевой гипотезы одновременного выполнения всех четырех требований. Глобальный критерий для проверки обобщенной гипотезы “выходит” в критическую область при нарушении хотя бы одного из перечисленных требований. Предварительные расчеты показали, что полная модель (1) не удовлетворяет требованиям обобщенного критерия и требует корректировки.

Показателем качества линейной регрессионной модели, как правило, служит коэффициент детерминации  $R^2$ , достигающий максимальных значений при включении всех предикторов. Однако не все признаки являются информативными. При отборе оптимального числа локаций для восстановления слоя осадков над Азовским морем был применен метод пошаговой регрессии с использованием информационных критериев AIC и BIC [12]. Такие критерии, как правило, учитывают не только точность “подгонки” модели, но и ее сложность. В результате этой процедуры отсеивался набор информативных признаков, критерий AIC или BIC которого был наименьшим.

При существовании сильной линейной зависимости (коллинеарности) между переменными точность оценки регрессионных коэффициентов снижается по сравнению со случаем, когда предикторы не коррелированы. Это объясняется следующим. Согласно теории регрессионного анализа [11], ковариационная матрица вектора коэффициентов регрессии  $a$  определяется формулой  $\text{Var}(a) = \sigma^2(\mathbf{P}^T\mathbf{P})^{-1}$ , где  $\sigma^2$  — дисперсия остатков регрессионной модели, а  $\mathbf{P}$  —  $(n \times k)$ -матрица осадков ( $k$  — число предикторов, в нашем случае локаций;  $n$  — число измерений количества осадков). Тогда [11, 15] в этом случае дисперсия  $j$ -го коэффициента регрессии  $a_j$  (кроме свободного члена) вычисляется по формуле

$$\sigma_{a_j}^2 = \frac{1}{1 - R_j^2} \frac{\sigma^2}{\sum_{i=1}^n (P_{ij} - \bar{P}_j)^2}, \quad (4)$$

где  $\bar{P}_j$  — среднее значение количества осадков  $P_j$  в  $j$ -й локации ( $j = 1, \dots, k$ );  $P_{ij}$  — элемент матрицы  $\mathbf{P}$  или количество осадков при  $i$ -м измерении в  $j$ -й локации ( $i = 1, \dots, n$ );  $R_j^2$  — коэффициент детерминации при регрессии количества осадков в  $j$ -й локации по всем другим  $k - 1$  локациям, который, собственно, отражает связанность между предикторами. Как видно из формулы, чем выше  $R_j^2$ , тем больше дисперсия регрессионных коэффициентов. В гипотетическом случае, если коррелированность предикторов отсутствует ( $R_j^2 = 0$ ), то первый множитель формулы становится равен единице. В статистической литературе этот

множитель получил название коэффициента возрастания дисперсии  $VIF = (1 - R_j^2)^{-1}$ . Для проверки мультиколлинеарности предикторов регрессионной модели обычно используется его аналог  $VIF_{кор} = VIF^{0,5\nu}$  [15], откорректированный на число степеней свободы  $\nu$ . Вывод о наличии мультиколлинеарности основывается на эмпирическом правиле, согласно которому в этом случае величина критерия  $VIF_{кор}$  должна быть больше 4.

Исключение коллинеарных предикторов позволяет уточнить вид регрессионной модели, однако надежная статистическая оценка коэффициентов регрессии по оптимальному набору информативных признаков может быть выполнена в случае отсутствия в выборке сомнительных значений, оказывающих существенное влияние на расчет. Как правило [11], выявление таких значений осуществляется путем анализа регрессионных остатков

$$\varepsilon = P_{\text{Азов}} - \hat{P}_{\text{Азов}} = P_{\text{Азов}} - \mathbf{P}\mathbf{a} = (I_n - H)P_{\text{Азов}}, \quad (2)$$

т. е. отклонений каждого из наблюдавшихся значений слоя осадков  $P_{\text{Азов}}$  от аппроксимирующей регрессии  $\hat{P}_{\text{Азов}}$ . В формуле (2)  $\mathbf{P}$  —  $n \times (k + 1)$ -матрица осадков, в которой слева добавлен столбец, состоящий из единиц, а остальные  $k$  колонок матрицы содержат данные измерений сумм осадков в каждой из  $k$  локаций. Вектор  $\mathbf{a}$  — вектор регрессионных коэффициентов, включая свободный член  $a_0$ , а матрица  $H = P(P^T P)^{-1} P^T$  является матрицей проекции наблюдаемых значений слоя осадков на пространство регрессоров.

Так, при известной структуре модели анализ содержащихся в выборке грубых выбросов (не согласующихся с рассматриваемой моделью) осуществляется путем проверки стандартизированных остатков множественной линейной регрессии  $r_i$ , которые имеют  $t$ -распределение [11]. Проверка значения каждого остатка с учетом поправок Бонферрони позволяет выявить значимые выбросы [14].

Анализ регрессионных остатков может быть полезен при выявлении значений, имеющих избыточное влияние на результаты регрессионного анализа и приводящих к “разбалансировке” регрессионной модели [11]. К распространенным подходам относится расчет диагональных элементов  $h_{ii}$  ( $0 \leq h_{ii} < 1$ ) матрицы  $H$ , которые отражают суммарный потенциал влияния  $P_{\text{Азов } i}$  ( $i$ -е значение слоя осадков над Азовским морем, рассчитанное по данным SEVIRI) на результат регрессии. Члены выборки, для которых выполняется условие  $h_{ii} > 2k/n$ , имеют достаточно большое влияние на результаты построения регрессионной модели. Альтернативным показателем влияния является расстояние Кука [13]

$$D_i = \frac{r_i^2}{k+1} \frac{h_{ii}}{1-h_{ii}}.$$

Первый множитель в этой формуле отражает рассогласование  $i$ -го наблюдения ( $P_{\text{Азов } i}$ ) с моделью ( $\hat{P}_{\text{Азов } i}$ ), тогда как второй — степень влияния этого наблюдения на оценку параметров модели.

При совместном использовании указанных критериев из общего набора карт распределения слоя осадков над Азовским морем может быть сформирована выборка, пригодная для оценки параметров множественной линейной регрессии методом наименьших квадратов или максимального правдоподобия.

Во всех статистических тестах был принят уровень значимости, равный 5%, за исключением специально оговоренных случаев.

## Статистическая связь слоя осадков над Азовским морем с отдельными локациями

В настоящей работе в первом приближении рассматривалась линейная зависимость интегрального слоя осадков над Азовским морем  $P_{\text{Азов}}$  от девяти локаций — уравнение (1), соответствующих расположению в регионе основных метеорологических станций. Однако выбранные предикторы могут быть недостаточно информативными для построения надежной регрессионной модели. К проблемам построения множественной линейной регрессии относят эффект “сверхподгонки”, коллинеарность предикторов, наличие грубых выбросов, усложняющих получение надежных статистических оценок и др. В этом случае ключевым становится вопрос об оптимальном числе предикторов модели. С одной стороны, увеличение их числа повышает относительную долю объясненной дисперсии (критерий  $R^2$ ), с другой стороны, избыточное число дублирующих предикторов приводит к эффекту, когда на независимой выборке регрессия дает ненадежные результаты.

Методом пошаговой регрессии был исключен набор признаков и получена модель, имевшая среди прочих вариантов наименьшие значения информационных критериев AIC или BIC [12]. В результате расчетов оказалось, что две локации — Мариуполь и Геничеськ — должны были быть исключены

$$P_{\text{Азов}}^* \sim P_2 + P_3 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 + P_9. \quad (3)$$

При этом множественный коэффициент детерминации составил  $R^2 \approx 98\%$ . Ключевой проблемой модели (3) стала связанность предикторов (их коллинеарность), при существовании которой снижается точность оценки регрессионных коэффициентов [15]. Результаты расчета коэффициента  $VIF$  подтвердили факт мультиколлинеарности модели (3):

Станция	2	3	5	6	7	8	9
$VIF$							
Модель (3)	3,81	4,78	2,50	6,23	8,28	3,58	5,28
Модель (4)	3,41	—	2,23	3,40	—	2,76	3,30

В связи с этим потребовались детальный анализ входящих в модель локаций-предикторов и выявление некоторых расположенных близко друг к другу локаций (рис. 1), таких как станции Мысовое и Опасное, Приморско-Ахтарск и Ейск. Исключение таких локаций позволяет решить проблему коллинеарности. Из двух близких локаций выбиралась та, включение которой в модель давало большее значение коэффициента  $R^2$ . В итоге был получен оптимальный набор переменных для регрессионной модели слоя осадков над морем:

$$P_{\text{Азов}}^* = a_0 + a_2 P_2 + a_3 P_3 + a_5 P_5 + a_6 P_6 + a_8 P_8 + a_9 P_9. \quad (4)$$

Критерий  $VIF$  для (4) представлен выше.

Локации, вошедшие в модель, включали Бердянск, Стрелковое, Таганрог, Приморско-Ахтарск и Опасное. Данные об осадках, полученные на этих метеорологических станциях, могут быть использованы для восстановления слоя осадков над Азовским морем.

На завершающем этапе результат глобального теста [20] подтвердил применимость методов наименьших квадратов или максимального правдоподобия для оценки параметров множественной линейной регрессии модели (4). Алгоритм, предложенный авторами работы [20], является обобщенным и более

мягким, более жесткие критерии проверки могут изменить выводы (особенно с учетом асимметричности функции распределения сумм осадков). Однако исчерпывающие выводы по этому вопросу могут быть сделаны при использовании большего объема спутниковых данных, которым в настоящее время авторы статьи не располагают.

Анализ остатков регрессионной модели позволил выявить в выборке ряд значений слоя осадков, оказывающих избыточное влияние на результаты регрессионного анализа и приводящих к “разбалансировке” регрессионной модели. Согласно расчетам, поля декадной суммы осадков с начальными датами 25 мая 2014 г., 5 июня 2013 г. и 25 июня 2015 г. имели высокие показатели влияния. Визуальный анализ полей осадков за первые сутки этих декад (рис. 1) свидетельствовал о существенной неоднородности пространственного распределения осадков, что, по-видимому, обусловило их “выпадение” из общей выборки данных. В дальнейшем при статистической оценке параметров модели восстановления слоя осадков над Азовским морем эти три карты были исключены.

Таким образом, с помощью разных статистических тестов был выявлен оптимальный вид статистической модели слоя осадков над Азовским морем. При расчете параметров модели (4) значение свободного члена  $a_0$  и коэффициента  $a_6$  при локации Таганрог оказались существенно незначимыми даже на уровне 10%. Окончательный набор предикторов для восстановления слоя осадков над Азовским морем по данным спутникового радиометра SEVIRI содержит четыре локации — Бердянск, Стрелковое, Приморско-Ахтарск и Опасное:

$$P_{\text{Азов}} = 0,356P_2 + 0,206P_5 + 0,268P_8 + 0,159P_9. \quad (5)$$

Коэффициент детерминации этой модели составил  $R^2 > 98\%$ , а средняя ошибка — чуть более 1 мм, хотя в случаях экстремальных осадков модель (5) занижала их сумму.

### Сравнение результатов расчета слоя осадков над Азовским морем разными способами

Стандартные подходы к расчету слоя осадков как составляющей водного баланса моря предполагают пропорциональный пересчет измеренных на береговых станциях сумм осадков в величину слоя над водным объектом через модульные коэффициенты [2, 7]. Расчет модульных коэффициентов может осуществляться следующими способами. Во-первых, через определение доли площади водного объекта, тяготеющей к каждой метеорологической станции,  $s_i = F_i/F$  ( $F_i$  — тяготеющая площадь к  $i$ -й станции,  $F$  — общая площадь водного объекта) и последующий расчет интегрального слоя осадков над объектом (морем) по простой формуле  $P = s_1P_1 + s_2P_2 + \dots + s_nP_n$  — метод средневзвешенного [2] (далее — метод МН). Весовые коэффициенты  $s_i$  могут быть вычислены методами многоугольников, радиусов или изокоррелят. Согласно наиболее простому методу многоугольников, места расположения метеорологических станций соединяются прямыми линиями, из середины которых проводятся перпендикуляры. Площадь тяготения приравнивается к площади многоугольника, ограниченной этими перпендикулярами и контурами объекта. Для станций, вошедших в модель (5) настоящей работы, уравнение связи, полученное этим методом, можно записать в виде:

$$P_{\text{Азов}} = 0,268P_2 + 0,223P_5 + 0,200P_8 + 0,283P_9. \quad (6)$$

Во-вторых, модульные коэффициенты можно определить на основе предположения о соответствии относительных отклонений осадков от норм на береговых станциях и над открытой частью моря [7] (далее — метод НОРМА). Для Азовского моря расчетная формула выглядит следующим образом [2]:

$$P = 0,14 \frac{\bar{P}_3}{\bar{P}_{б3}} \cdot P_{б3} + 0,86 \frac{\bar{P}_м}{\bar{P}_{бм}} P_{бм}, \quad (7)$$

где  $\bar{P}_3, \bar{P}_м$  — нормы осадков для Таганрогского залива и остальной части Азовского моря соответственно;  $\bar{P}_{б3}, \bar{P}_{бм}$  — среднеарифметический слой осадков, рассчитанный по значениям нормы осадков станций для Таганрогского залива (Мариупольская обсерватория, станции Таганрог и Ейск) и остальной части Азовского моря (станции Бердянск, Геничеськ, Мысовое и Темрюк);  $P_{б3}, P_{бм}$  — средние суммы осадков по данным береговых станций залива и открытой части Азовского моря за конкретный месяц или год. Данные о количестве осадков, характерном для залива и открытой части моря, взяты с учетом соотношения их площадей 0,14 : 0,86.

Результаты расчета по полученной модели (5), которую обозначим как метод “SEVIRI”, были сопоставлены с данными, полученными с использованием указанных выше стандартных подходов оценки слоя осадков над Азовским морем за период 1976—2010 гг. При восстановлении интегрального слоя методом средневзвешенного (6) данные прямых измерений на метеорологических станциях были также откорректированы на величину систематических ошибок (см. раздел “Материалы исследования”). Пересчет по отношению норм осадков на береговых станциях и в открытой части моря не проводили, данные для сравнения были взяты из монографии [7] и таблиц ЕДМ за аналогичный период.

О результатах сравнения годового слоя осадков над поверхностью Азовского моря, а также о диаграммах размахов (“ящик с усами”) отклонений разных способов расчета друг по отношению к другу можно судить по данным рис. 2. Видно, что результаты расчета интегрального стока с помощью метода НОРМА, приведенные в работе [7], и методов МН и SEVIRI существенно различаются: среднеквадратическое отклонение метода НОРМА по сравнению с другими составляет 130—150 мм годового слоя осадков, тогда как различие между методами МН и SEVIRI не превысило 30 мм. Различие в 130—150 мм

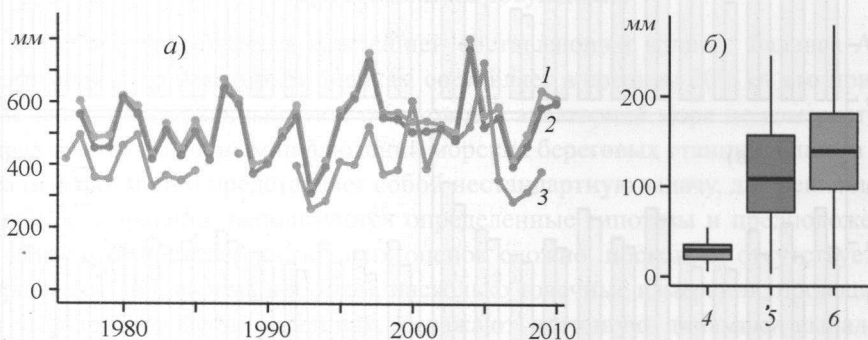


Рис. 2. Изменение годового слоя осадков над Азовским морем за 1976—2010 гг., рассчитанного разными способами (а), и диаграмма абсолютных отклонений слоя осадков для разных способов расчета годового слоя друг относительно друга (б).

Расчет по методу: 1 — SEVIRI; 2 — МН; 3 — НОРМА; отклонение между методами: 4 — SEVIRI и МН; 5 — SEVIRI и НОРМА; 6 — НОРМА и МН.

составляет 32—37% от среднемноголетнего слоя осадков (404 мм), полученного методом НОРМА.

Существенная погрешность при использовании метода НОРМА во многом обусловлена недостаточной корректировкой и приведением измеренных сумм осадков к их действительным значениям. Авторы методики использовали данные метеорологических станций с поправками на недоучет твердых осадков из-за выдувания ветром и смачивания стенок водосборных сосудов [9]. Установлено [1, 3, 10], что корректировки измеренных сумм, осуществляемой на станциях, недостаточно для получения действительных значений количества осадков. Для подтверждения этого авторами настоящей статьи был произведен расчет действительных сумм осадков для четырех станций Приазовья, значения которых используются для восстановления интегрального слоя осадков над морем по модели (5), а также проведено сравнение (рис. 3) полученных результатов с данными работы [7]. Для определения действительных сумм осадков был использован метод ГГО — КазНИИ [3], который наряду с методикой ГГИ — ГГО [1] является более точным способом корректировки данных об осадках для территорий на юге России [10]. Сравнение проводили по среднемноголетним суммам за месяц и за год, рассчитанным за период 1976—2010 гг.

Значительные отклонения между поправками (до 18 мм) характерны для зимнего периода и для марта (рис. 3а). Вследствие использования стандартной методики недоучет осадков в период с января по март для разных станций колеблется в пределах от 27 до 37% (рис. 4а), в теплый период (с мая по октябрь) недоучет не превышает 17%. Основным вкладом в поправку к измеренным осадкам в холодный период года является ветровой недоучет. Сильные ветра, особенно на северном побережье Азовского моря, являются основным фактором, приводящим к увеличению аэродинамического поправочного коэффициента. Для конкретных месяцев недоучет осадков может составлять несколько десятков процентов, а при незначительных осадках и осадках, обозначаемых

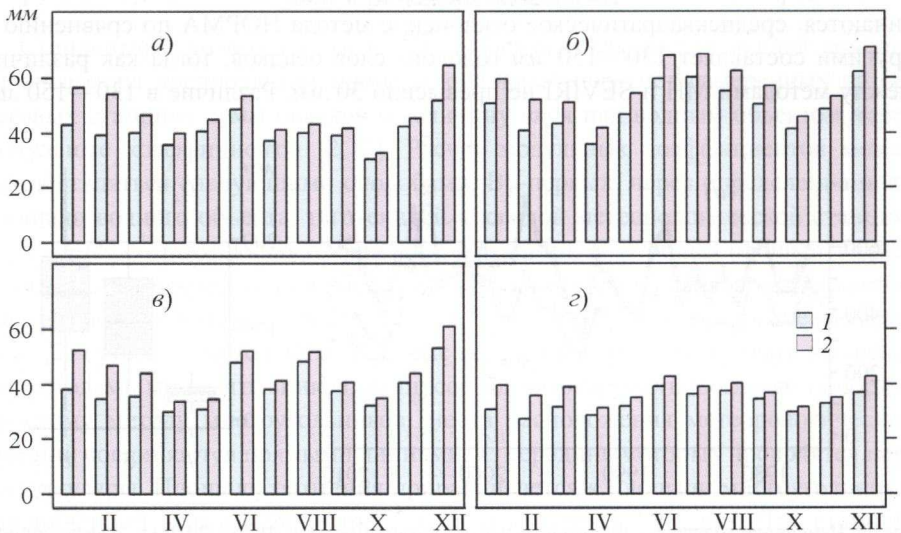


Рис. 3. Средние месячные значения исправленных сумм осадков по методам НОРМА (1) и ГГО — КазНИИ (2) за период 1976—2010 гг. по данным береговых станций Азовского моря.

а) Бердянск; б) Приморско-Ахтарск; в) Опасное; з) Стрелковое.

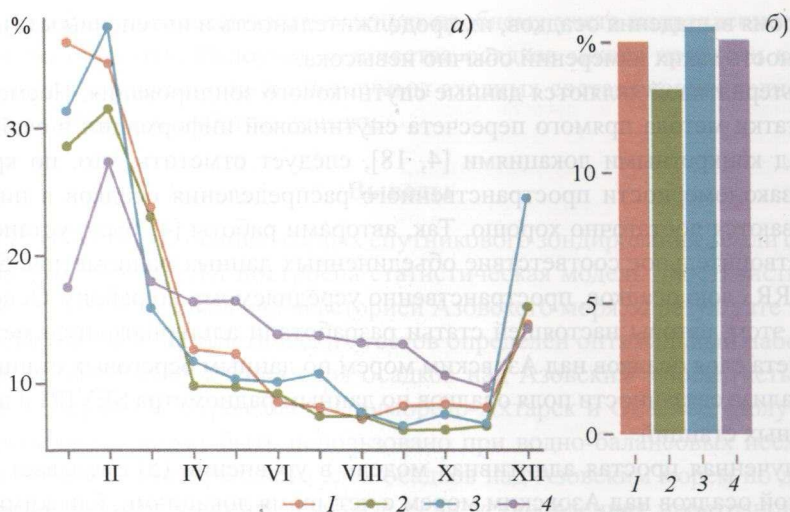


Рис. 4. Недочет месячных (а) и годовых (б) сумм осадков в методе НОРМА для береговых станций Азовского моря.

1 — Опасное; 2 — Стрелковое; 3 — Бердянск; 4 — Приморско-Ахтарск.

как “следы осадков”, — до сотен процентов и более. По результатам за год недоучет стандартного метода достигает от 50 мм (Стрелковое) до 90 мм (Приморско-Ахтарск). В процентном отношении недоучет среднемноголетних годовых сумм осадков составляет 13—16% (рис. 4б).

Таким образом, выявленное отклонение данных об интегральных слоях осадков над Азовским морем, опубликованных в монографии [7] и таблицах ЕДМ за период после 1990 г., примерно наполовину связано с недостаточной корректировкой данных измерений сумм осадков. Другой фактор несоответствия значений слоев осадков связан с недостаточным воспроизведением методом, приведенным в работе [7], пространственной структуры поля осадков над морем.

### Результаты и их обсуждение

Слой осадков является важнейшей составляющей водного баланса Азовского моря и по некоторым оценкам составляет в среднем 20% от его приходной части. Интегральный слой осадков над акваторией моря не измеряется, а определяется по данным наблюдений морских береговых станций. Оценка слоя осадков над морем представляет собой нестандартную задачу, для решения которой, как правило, используются определенные гипотезы и предположения. Подтвердить достоверность таких оценок сложно, поскольку отсутствует исчерпывающая информация о том, насколько точечные измерения, проводимые на метеорологических станциях, отражают истинную динамику выпадения осадков над акваторией моря, учитывая сложную природу этого явления, зачастую локальность и, как следствие, неоднородность распределения осадков даже в масштабах Азовского моря.

Предполагалось в качестве косвенных данных об осадках в открытой части моря использовать результаты наблюдений на экспедиционных и попутных су-

дах (время выпадения осадков, их продолжительность и интенсивность). Однако точность таких измерений обычно невысока.

Альтернативой являются данные спутникового зондирования. Несмотря на недостатки метода прямого пересчета спутниковой информации в слой осадков над конкретными локациями [4, 18], следует отметить, что, по крайней мере, закономерности пространственного распределения осадков в них прослеживаются достаточно хорошо. Так, авторами работы [4] было установлено удовлетворительное соответствие объединенных данных радиометров SEVIRI и AVHRR слою осадков, пространственно усредняемому по району. Основываясь на этом, авторы настоящей статьи разработали альтернативную методику пересчета слоя осадков над Азовским морем по данным береговых станций путем анализа связанности поля осадков по данным радиометра SEVIRI и данных отдельных станций.

Полученная простая аддитивная модель в уравнении (5) связывает декадный слой осадков над Азовским морем с четырьмя локациями, близкими к метеорологическим станциям Бердянск, Стрелковое, Приморско-Ахтарск и Опасное. Выбранные локации расположены в пределах масштаба корреляционной связанности поля осадков над морем. Согласно данным работы [6], масштаб корреляции декадных сумм осадков для региона исследования составляет примерно 110 км. С учетом линейных размеров Азовского моря (360 км — между Арабатской стрелкой и дельтой Дона, 180 км — с севера на юг) поле осадков над его акваторией является локально неоднородным [6]. Очевидно, что после проведения всех статистических тестов были отобраны достаточно отдаленные локации в пределах указанного масштаба.

Для улучшения качества восстановления данных об осадках по спутниковым данным некоторыми авторами в уравнениях использовалось слагаемое, отражающее внутрисезонную изменчивость осадков [4]. Включение такого слагаемого в настоящую модель (5) является спорным, поскольку осадки в локациях-предикторах модели уже имеют сезонную составляющую. Следует отметить, что существуют различия в связанности поля осадков в разные сезоны [6]. Параметры модели связанности осадков в этом случае, как правило, изменяются в течение года. Это необходимо учитывать [23] при определении параметров корреляционной функции осадков. Для выполнения подобного анализа в настоящей работе недостаточно спутниковых данных SEVIRI — нет репрезентативной выборки данных по каждому календарному месяцу (сезону). Например, автор работы [23] анализ сезонной зависимости параметров корреляционной функции проводил по суточным данным за 10-летний период. Такой анализ будет возможным только при получении с помощью спутниковых радиометров новых данных об осадках по району Азовского моря.

Значения регрессионных коэффициентов при каждой локации модели (5) и весовых коэффициентов, полученных по уравнению (6), которое было выведено при расчете средневзвешенного слоя осадков по данным метеорологических станций [2], сравнительно близки, что является обоснованным, поскольку конечная цель двух способов расчета слоя осадков — попытка определить пространственную структуру поля осадков. Такой подход отличается от способа, описанного в работе [7], где акцент смещен на использование морфометрической характеристики моря (например, соотношения площади Таганрогского залива и открытой части Азовского моря). Кроме того, сравнение методов

позволило выявить чрезвычайно важную проблему учета исправленных сумм осадков на станциях. Недоучет количества осадков может привести к существенной погрешности при оценке суммы входных составляющих водного баланса, увеличивая его общую невязку.

### Выводы

Таким образом, на основе данных спутникового зондирования Земли с помощью радиометра SEVIRI построена статистическая модель пространственной связанности поля осадков над акваторией Азовского моря. В результате применения специальных статистических тестов определен оптимальный набор предикторов для восстановления слоя осадков над Азовским морем (четыре локации) — Бердянск, Стрелковое, Приморско-Ахтарск и Опасное. Полученное уравнение связи может быть использовано при водно-балансовых исследованиях для расчета интегрального слоя осадков над Азовским морем по данным метеорологических станций, в случае если установленная пространственная зависимость отражает объективную связанность поля осадков.

Сравнение новой модели с опубликованными в литературе данными выявило существенные различия в оценках годового слоя осадков над Азовским морем (до 37%). Согласно расчетам, недоучет осадков в опубликованных ранее данных связан в равной степени с недостаточной корректировкой данных измерений на метеорологических станциях и неверным воспроизведением пространственной структуры поля осадков над морем. Полученный результат приводит к необходимости пересмотра всех составляющих водного баланса Азовского моря, представленных в монографии [7], и пересчета таблиц ЕДМ за доступный исторический период.

Авторы выражают благодарность ФГБУ “НИЦ “Планета” за предоставление спутниковых данных спектрорадиометра SEVIRI по району Азовского моря за 2013—2015 гг.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-50203.

### Литература

1. Богданова Э. Г., Голубев В. С., Ильин Б. М., Драгомилова И. В. Новая модель корректировки измеренных осадков и ее применение в полярных районах России. — Метеорология и гидрология, 2002, № 10, с. 68—94.
2. Браславский А. П., Остроумова Л. П. Определение слоя атмосферных осадков, выпадающих на поверхность оз. Балхаш. — Труды Казахского регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института, 1989, вып. 104, с. 66—81.
3. Браславский А. П., Струзер Л. Р., Шергина К. Б. Методика определения исправленных величин атмосферных осадков при срочных наблюдениях. — Труды ГГО, 1975, вып. 341, с. 32—50.
4. Волкова Е. В. Определение сумм осадков по данным радиометров SEVIRI/Meteosat-9, 10 и AVHRR/NOAA для Европейской территории России. — Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2014, т. 11, № 4, с. 163—177.
5. Волкова Е. В., Успенский А. Б. Оценки параметров облачного покрова по данным геостационарного МИСЗ Meteosat-9 круглосуточно в автоматическом режиме. — Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2010, т. 7, № 3, с. 16—22.
6. Гандин Л. С., Каган Р. Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. — Л., Гидрометеиздат, 1976, 360 с.

7. **Гидрометеорология** и гидрохимия морей СССР. Т. V. Азовское море. — СПб, Гидрометеоздат, 1991, 235 с.
8. **Методы** изучения и расчета водного баланса. /Под ред. В. С. Вуглинского, Г. С. Клейна и др. — Л., Гидрометеоздат, 1981, 397 с.
9. **Наставление** гидрометеорологическим станциям и постам. — Л., Гидрометеоздат, 1985, вып. 3, ч. 1, 300 с.
10. **Остроумова Л. П.** Определение действительных величин атмосферных осадков по наблюдениям на метеорологических станциях, используемых в водном балансе Северного Каспия. — Труды ГОИН, 2014, вып. 215, с. 257—276.
11. **Себер Дж.** Линейный регрессионный анализ. — М., Мир, 1980, 456 с.
12. **Akaike H.** A new look at the statistical model identification. — IEEE Transactions on Automatic Control, 1974, vol. 19, No. 6, pp. 716—723, doi: 10.1109/TAC.1974.1100705.
13. **Cook R. D.** Detection of influential observation in linear regression. — Technometrics, 1977, vol. 19, No. 1, pp. 15—18.
14. **Cook R. D. and Weisberg S.** Residuals and Influence in Regression. — New York, London, Chapman and Hall, 1982, 240 p.
15. **Fox J. and Monette G.** Generalized collinearity diagnostics. — JASA, 1992, vol. 87, pp. 178—183.
16. **Giannakos A. and Feidas H.** Classification of convective and stratiform rain based on the spectral and textural features of Meteosat Second Generation infrared data. — Theor. Appl. Climatol., 2013, vol. 113, pp. 495—510, doi: 10.1007/s00704-012-0802-z.
17. **Heinemann T., Latanzio A., and Roveda F.** The Eumetsat multi-sensor precipitation estimate (MPE). /In: Proceedings of the Second International Precipitation Working Group (IPWG) Meeting, Madrid, Spain, September 2002.
18. **Kidd C., Levizzani V., and Laviola S.** Quantitative precipitation estimation from Earth observation satellites, rainfall: State of the science. /In: Geophysical Monograph Series, 2010, No. 191, pp. 127—158.
19. **Kuhnlein M., Appelhans T., Thies B., and Naub T.** Precipitation estimates from MSG SEVIRI daytime, nighttime, and twilight data with random forests. — J. Appl. Meteorol. Clim., 2014, vol. 53, pp. 2457—2480.
20. **Pena E. A. and Slate E. H.** Global validation of linear model assumptions. — J. Amer. Statist. Assoc., 2006, vol. 101, No. 473, pp. 341—354.
21. **R Core Team.** A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2012; <http://www.R-project.org/>.
22. **Roebeling R. A. and Holleman I.** SEVIRI rainfall retrieval and validation using weather radar observations. — J. Geophys. Res., 2009, vol. 114, D21202; doi: 10.1029/2009JD012102.
23. **Stol P. T.** The relative efficiency of the density of rain-gage networks. — J. Hydrol., 1972, vol. 15, pp. 193—208.
24. **Wang X. L., Chen H., Wu Y., Feng Y., and Pu Q.** New techniques for detection and adjustment of shifts in daily precipitation data series. — J. Appl. Meteorol. Climatol., 2010, vol. 49, pp. 2416—2436.

Поступила в редакцию 28 IV 2017 г., после доработки 8 VIII 2017 г.

## CALCULATION OF PRECIPITATION AS A WATER BALANCE COMPONENT OF THE SEA OF AZOV

V. P. Evstigneev, D. V. Mishin, and L. P. Ostroumova

*A statistical model of the spatial coupling of precipitation over the Sea of Azov is constructed using SEVIRI radiometer data. The set of four locations of precipitation field was identified to retrieve the integral precipitation depth over the sea. It was found that the model can be applied for water-balance studies of the Sea of Azov based on data of coastal weather stations.*

## Многолетние изменения основных составляющих водного режима озера Ханка

Н. А. Сперанская\*, Т. В. Фуксова\*

*Представлены результаты анализа изменений годовых сумм осадков и годового испарения в акватории оз. Ханка за период с 1949 по 2015 г. на основе данных наблюдений на метеорологических станциях в бассейне озера. Достоверность расчетных характеристик, определяющих величину испарения, подтверждена сравнением с результатами наблюдений на испарительном бассейне площадью 20 м<sup>2</sup>, расположенном на озерной станции Астраханка. Показано, что за весь расчетный период на фоне значительных межгодовых колебаний направленные изменения годовых сумм осадков практически отсутствуют. Однако с начала 2000-х годов отмечается достаточно устойчивый рост их величины, обусловленный в основном увеличением количества осадков в летний период. Величина годового испарения с 1949 по 2015 г. уменьшается, причем скорость этого уменьшения до 1980 г. больше, чем в последующий период. При этом в последнее десятилетие отмечается некоторое увеличение испарения. Основной вклад в изменения испарения вносит изменение средней скорости ветра, обуславливая около 50% его дисперсии. Вторым по значимости является дефицит влажности воздуха, который определяет чуть более 20% дисперсии годового испарения. Показано также, что к середине XXI в. возможно увеличение годовых сумм осадков, изменения годового испарения с акватории оз. Ханка при этом будут минимальны. При таких изменениях основных элементов водного режима озера не следует ожидать снижения его уровня вследствие естественных климатических процессов.*

**Ключевые слова:** озеро Ханка, осадки, испарение с водной поверхности, метеорологические величины, натурные наблюдения, многолетние изменения.

### Введение

Озеро Ханка — самое крупное озеро Приморского края, для которого в течение последних лет отмечается непрерывный подъем уровня: с 2000 г. он повысился на 1,87 м и в 2015 г. достиг отметки 69,78 м БС77, что превышает исторический максимум за период инструментальных наблюдений за уровнем озера.

Поскольку оз. Ханка относится к слабопроточным озерам, то его водный баланс в значительной мере определяется соотношением количества осадков и испарения с его акватории. При этом осадки составляют более 50% приходной части водного баланса озера, а испарение — около 60% его расходной части.

Для объяснения причин катастрофического подъема уровня озера необходим анализ основных элементов водного баланса (количества осадков и испарения). Однако опубликованных работ, посвященных исследованию годовых ве-

\* Государственный гидрологический институт; e-mail: speran@mail.rcom.

личин осадков в бассейне оз. Ханка и испарения с его акватории за длительный период, крайне мало.

Первые оценки годовых сумм осадков для оз. Ханка были получены для периода 1930—1952 гг. [6, 23] по данным наблюдений на прибрежных станциях без введения каких-либо поправок. В монографии [7] многолетняя норма годовых осадков на акватории оз. Ханка была оценена для периода 1891—1950 гг. по картам норм с введением поправок на выдувание и смачивание.

Первые оценки изменения годовых сумм осадков с 1949 по 1971 г. появились в монографии М. Г. Васьковского [5]. Сумма осадков для каждого года в ней была оценена на основе изогий на акватории озера, построенных по данным окружающих станций и постов. В данные наблюдений были введены переходный коэффициент от дождемера к осадкомеру и поправочный коэффициент на смачивание для данных за 1949—1966 гг. (поправка на ветровой недоучет в расчет не принималась). Полученные оценки вошли в дальнейшие исследования [8, 9, 17], в которых были проанализированы изменения годовых сумм осадков с 1949 по 1980 г. Как и в монографии [5], поправки на ветровой недоучет осадков в них внесены не были. Только в [9], где дополнительно приведены оценки годовых осадков с 1981 до 2005 г., в данные об осадках для этого периода были введены эти поправки.

Оценки средних многолетних годовых сумм осадков по данным разных работ находятся в пределах от 507 до 630 мм. Столь значительный разброс объясняется главным образом принятыми авторами этих работ подходами к корректировке осадков, методами оценки и периодами осреднения.

При первых попытках оценить испарение с поверхности оз. Ханка [26] конкретные значения не были получены, но уже тогда отмечалась важность испарения в определении водного баланса озера. В 1950—1960-х годах появились количественные оценки испарения с акватории [6, 7, 13, 21, 23]. Однако результаты разных авторов оказались практически несопоставимы вследствие различий примененных методов оценки и периодов осреднения исходных данных.

Наиболее полные и обоснованные оценки испарения с акватории оз. Ханка и анализ его межгодовых изменений с 1949 по 1971 г. содержатся в монографии [5]. В дальнейшем они вошли в разные публикации о водных ресурсах данного региона [9, 10, 16, 17]. Однако приведенные в монографиях [16, 17] годовые значения испарения за 1972—1980 гг. вызывают серьезные сомнения (они необъяснимо большие).

Общий разброс оценок годового испарения с акватории озера, полученных в разных исследованиях, находится в диапазоне от 520 до 670 мм, что отражает сложность выбора оптимального метода для оценки его величины.

Существенный разброс в оценках годовых сумм осадков и испарения определил необходимость уточнения количества осадков в районе оз. Ханка и испарения с его акватории и анализа многолетней динамики изменений этих элементов водного режима озера.

В течение 2016 г. в Государственном гидрологическом институте (ГГИ) проведены детальные исследования причин повышения уровня оз. Ханка, по результатам которых появились публикации, в которых в той или иной степени рассматриваются изменения испарения и осадков на акватории озера [1, 3, 12]. Однако подробный анализ изменения величины годового испарения и годовых сумм осадков в данных публикациях отсутствует.

Более подробное исследование соотношения количества осадков и испарения на акватории оз. Ханка приведено в данной статье.

### Район исследований

Озеро Ханка расположено в центре Приханкайской низменности на границе с Китайской Народной Республикой (рис. 1), которой принадлежит северная часть озера (немногим более четверти его площади). В озеро впадает 28 рек разной величины (восемь с территории Китая и 20 с территории России), а вытекает только одна — р. Сунгач, которая соединяет озеро с бассейном р. Амур (через р. Усури). Площадь поверхности воды непостоянна и меняется в зависимости от климатических условий.

Режим осадков Приханкайской низменности и бассейна оз. Ханка тесно связан с атмосферной циркуляцией, на которую накладывается влияние рельефа местности. Отроги хребтов на западе и востоке частично задерживают влажные воздушные потоки, приносящие муссонные осадки на Приханкайскую низменность в летнее время. Зимой холодные и сухие воздушные массы, приходящие из внутренних районов материка, где господствует сибирский антициклон, беспрепятственно проникают в район озера.

Испарение с водной поверхности определяется комплексом природных процессов, характерных для климата Приханкайской низменности, наиболее значимыми из которых являются режим скорости ветра и изменение характеристик влажности воздуха.

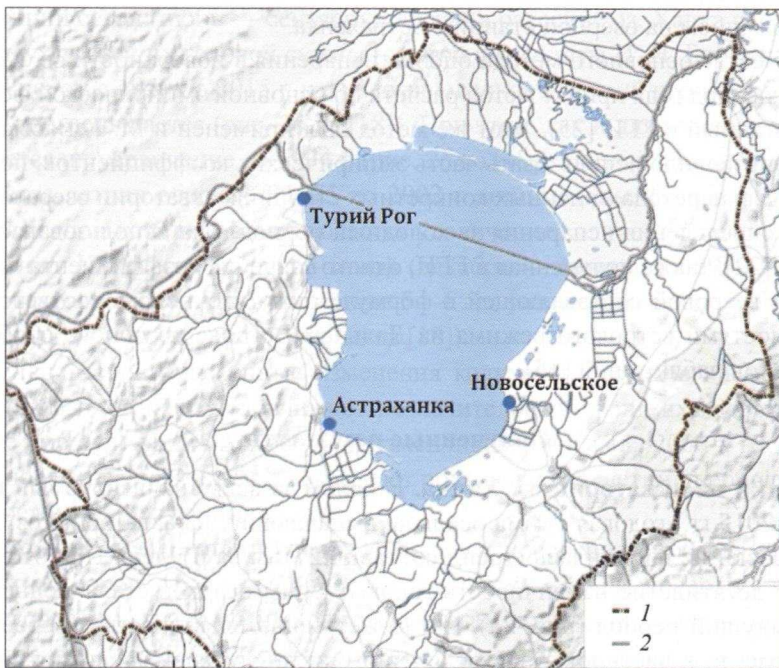


Рис. 1. Расположение станций, данные которых использованы при расчете испарения с акватории оз. Ханка.

1 — бассейн оз. Ханка; 2 — государственная граница Российской Федерации.

## Исходные данные и метод оценки количества осадков и испарения для акватории озера

В работе использованы среднемесячные значения гидрометеорологических характеристик по данным наблюдений на метеорологических станциях Астраханка, Турий Рог и Новосельское (рис. 1), на гидрологических постах Астраханка и Турий Рог, а также на гидрологических разрезах за период с 1949 по 2015 г.: температуры воздуха и высоты снежного покрова на станциях; количества осадков с учетом всех поправок; влажности воздуха и скорости ветра на высоте флюгера; температуры воды на станциях и на акватории озера; данные о характеристиках ледового режима на акватории.

Ряды среднемесячных значений ветра были приведены к однородному виду введением в исходные данные поправок, связанных с изменением сроков наблюдений в 1966 г., и пересчитаны для высоты 2 м в соответствии с указаниями [25].

Метеорологические характеристики для акватории озера в целом были рассчитаны в соответствии с [25] на основе данных наблюдений на прибрежных метеостанциях с учетом площади озера, тяготеющей к каждой станции. Таким же образом приводились и данные наблюдений за осадками, используемые при анализе изменения режима годовых сумм осадков.

Для оценки достоверности рассчитанных значений метеовеличин на акватории оз. Ханка и испарения с его поверхности использованы материалы наблюдений за испарением и сопутствующими величинами (осадки, скорость ветра, влажность воздуха, температура воды и воздуха) за теплый период года (май — октябрь) с 1957 по 2015 г. на испарительном бассейне площадью 20 м<sup>2</sup>, расположенном на озерной станции Астраханка.

В качестве основного метода оценки испарения с поверхности оз. Ханка за теплый период года принят метод расчета по основной эмпирической формуле, разработанный в ГГИ [25]. Этот же метод был применен и М. Г. Васьковским [5], что позволило использовать часть эмпирических коэффициентов, полученных им для перехода от данных конкретных станций к акватории озера в целом.

Для определения испарения за холодный период года использовалась формула из [22], также полученная в ГГИ, однако значение коэффициента для компонента ветровой составляющей в формуле было уточнено в соответствии с особенностями ветрового режима на Дальнем Востоке на основе обобщения материалов наблюдений [15].

### Полученные результаты

**Осадки на акватории оз. Ханка.** В целом за весь анализируемый период (1949—2015 гг.) годовая сумма осадков, выпадающих на акваторию оз. Ханка, практически не изменилась (тренд составил 27 мм за 67 лет). При этом в последнее десятилетие изменчивость годовых сумм осадков стала меньше, чем в предыдущий период (рис. 2а), что может свидетельствовать о перестройке их режима и, в частности, об увеличении числа случаев выпадения сильных осадков [11].

На фоне кратковременных периодов увеличения и уменьшения количества осадков (рис. 2а) в целом с 1949 по 1974 г. отмечается явный рост годовой суммы осадков (тренд 113 мм за 26 лет). После заметного уменьшения количества

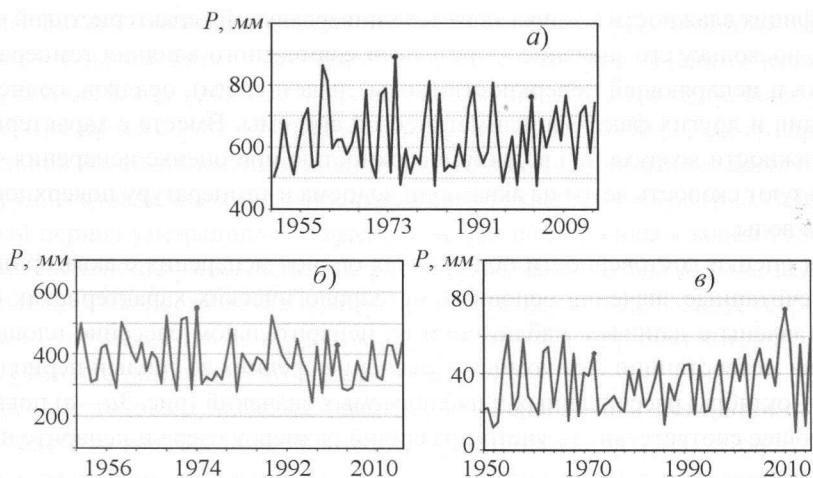


Рис. 2. Изменения годовых сумм осадков на акваторию оз. Ханка (со всеми поправками) (а) и осадков (без поправки на ветровой недоучет) в летний (б) и зимний (в) периоды в бассейне озера. Рисунки 2б, в — по данным И. И. Борзенковой из работы [18].

осадков в 1975 г. направленные изменения годовых сумм осадков до 2002 г. минимальны, с 2003 г. годовая сумма осадков на акваторию озера достаточно устойчиво растет (тренд 99 мм за 13 лет).

В отличие от годовых сумм в данные об осадках в бассейне оз. Ханка за сезон [18] поправки на ветровой недоучет не вносились, однако основные тенденции их изменения выделяются достаточно надежно.

В летний сезон (июнь — сентябрь) осадки в бассейне оз. Ханка составляют более двух третей их годовой суммы (смотри результаты И. И. Борзенковой из [18]). В целом с 1950 по 2015 г. количество осадков в летний период в бассейне несколько уменьшается (рис. 2б из [18]). При этом, как и для годовых осадков, отмечается их увеличение до 1974 г. (рис. 2б из [18]). Направленные изменения количества летних осадков с 1975 по 2002 г. минимальны. Начиная с 2003 г., как и для годовых величин, наблюдается увеличение количества осадков в летний период. Количество осадков зимой (декабрь — февраль) в 1950—2015 гг. устойчиво растет, при этом в последние 5—6 лет увеличение осадков сменяется их небольшим уменьшением (рис. 2в из [18]).

Именно разнонаправленные изменения количества осадков на акваторию озера летом и зимой обуславливают незначительный тренд их годовых сумм на фоне уменьшения их межгодовой изменчивости с начала 2000-х годов. При этом в последнее десятилетие возрастает роль осадков в летний период в изменении режима и их годовых сумм.

**Испарение с акватории озера.** Изменения испарения определяются комплексом метеорологических процессов. Рост температуры поверхности водоема и скорости ветра и уменьшение влажности приземного слоя воздуха увеличивают испарение. Оказывают влияние на испарение осадки, облачность и солнечная радиация. Все эти процессы взаимосвязаны, и оценить степень воздействия на испарение каждой отдельной переменной сложно. Однако среди множества метеорологических факторов можно выделить некоторые процессы, оказывающие максимальное влияние на испарение с водной поверхности.

Дефицит влажности воздуха является универсальной характеристикой влажности, поскольку его значение — результат совместного влияния температуры воздуха и испаряющей поверхности (воды, льда и снега), осадков, солнечной радиации и других факторов климатической системы. Вместе с характеристикой влажности воздуха над водной поверхностью при оценке испарения часто используют скорость ветра на акватории водоема и температуру поверхностного слоя воды.

Для оценки достоверности полученных оценок испарения с акватории озера рассчитанные значения основных метеорологических характеристик были сопоставлены с данными наблюдений на испарительном бассейне площадью  $20 \text{ м}^2$  на метеостанции Астраханка. Сравнение средних за теплый период года (май — октябрь) рассчитанных и наблюдаемых значений (рис. 3а—в) показало их хорошее соответствие (с учетом различий размеров озера и испарительного бассейна).

За рассматриваемый временной интервал 1949—2015 гг. для теплого периода года наблюдаются увеличение дефицита влажности воздуха и уменьшение скорости ветра на акватории озера (рис. 3а, б). Отмечается также повышение температуры поверхности воды.

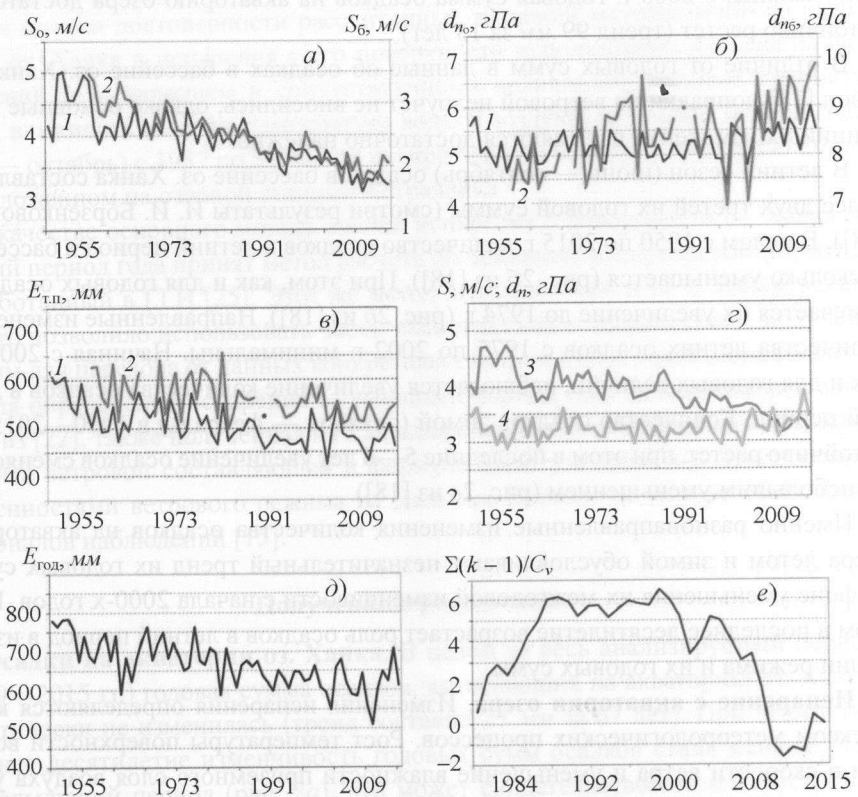


Рис. 3. Межгодовые изменения рассчитанных (1) и наблюдаемых (по бассейну  $20 \text{ м}^2$ ; 2) значений скорости ветра (а), дефицита влажности воздуха (б), величины испарения (в) для теплого периода года (май — октябрь) и средних годовых значений скорости ветра (з, з), дефицита влажности воздуха (д; 4) и испарения с акватории озера (д), а также интегрально-разностная кривая для годового испарения за 1980—2015 гг. (е).

Подобный характер изменения прослеживается для рассчитанных характеристик и в целом за год. Так, среднее годовое значение дефицита влажности воздуха (рис. 3з) за 1949—2015 гг. выросло на 0,8 *гПа*, а его устойчивое увеличение отмечается с 1981 г. В течение последних 18 лет (1998—2015 гг.) при максимальной интенсивности изменений рост годового дефицита составил 0,4 *гПа*.

Среднегодовое значение скорости ветра на акватории озера (рис. 3г) за расчетный период уменьшилось более чем на 1,0 *м/с*. Начиная с конца 1980-х годов интенсивность уменьшения скорости ветра максимальна (0,7 *м/с* за 29 лет). Уменьшение скорости ветра в этом регионе и на большей части территории России отмечается также в работах [4, 11], одной из причин которого может быть уменьшение барических градиентов [2, 4].

Средние годовые значения температуры испаряющей поверхности (вода, лед и снег) за рассматриваемый период увеличились на 1,7°C. При этом скорость повышения температуры со второй половины 1980-х годов превышает ее изменения за предшествующий период.

На основе полученных средних для акватории значений метеорологических величин были рассчитаны месячные и годовые значения испарения и его значение для теплого периода (май — октябрь).

Сравнение рассчитанной величины испарения с поверхности озера и наблюдаемой на испарительном бассейне 20 *м²* за теплый период (рис. 3в) показало хорошее соответствие как их межгодовых флуктуаций, так и направленности многолетних изменений за период 1957—2015 гг. Несмотря на различие площадей испарительного бассейна и всего озера, совпадение характера изменения двух рядов подтверждает достоверность полученных результатов.

Тренд годового испарения с поверхности оз. Ханка (рис. 3д) за исследуемый период (1949—2015 гг.) составил -147 *мм*. При этом весь период можно разделить на две фазы: достаточно интенсивное уменьшение испарения (-2,0 *мм/год*) с 1949 по 1980 г. и менее заметное его изменение (-1,2 *мм/год*) с 1981 г. Следует также отметить, что именно изменения испарения с открытой водной поверхности определяют тенденцию изменения его величины в целом за год. Уменьшение испарения на фоне повышения температуры воздуха и увеличения количества осадков хорошо укладывается в феномен так называемого парадокса испарения [27]. Испарение с водной поверхности в процессе глобального потепления практически во всех регионах земного шара уменьшается вопреки его ожидаемому увеличению.

Для рассматриваемого периода 1949—2015 гг. получены следующие статистические характеристики изменения годовой суммы осадков и годового испарения для акватории оз. Ханка:

Параметр	$\bar{X}$ , мм	$\sigma$ , мм	$\beta$	$\sigma_\beta$	Тренд, процент от среднего	Значимость тренда
Осадки	632	108	0,411	0,683	4	Незначим
Испарение	666	60,6	-2,198	0,382	-22	Значим

Здесь  $\bar{X}$  — среднее значение;  $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение;  $\beta$  — коэффициент линейного тренда;  $\sigma_\beta$  — дисперсия ошибки. При этом для всего периода (с 1949 по 2015 г.) значимость отрицательного тренда испарения с поверхности оз. Ханка превышает 95%-ный уровень в отличие от незначимого тренда осадков.

Таблица

**Линейный тренд за 1949—2015 гг. испарения и основных метеорологических величин за теплый период (май — октябрь)**

Величина, единицы измерения	V	VI	VII	VIII	IX	X	Теплый период
Испарение, мм	-0,389 (-31,2)	-0,231 (-17,8)	-0,217 (-15,8)	-0,369 (-24,6)	-0,213 (-17,0)	-0,063 (-6,8)	-1,483 (-19,6)
Скорость ветра, м/с	-0,022 (-31,0)	-0,021 (-34,6)	-0,021 (-37,8)	-0,019 (-37,2)	-0,019 (-35,8)	-0,011 (-18,8)	-0,019 (-32,2)
Дефицит влажности, гПа	-0,003 (-5,2)	0,006 (8,2)	0,010 (11,6)	0,003 (2,8)	0,009 (10,8)	0,001 (2,4)	0,004 (5,6)

*Примечание.* В скобках указан линейный тренд в процентах.

На фоне этих изменений с конца 1990-х годов наблюдается увеличение годового испарения, на что указывает также характер интегрально-разностной кривой для 1981—2015 гг. (рис. 3е). Аналогичные тенденции изменения испарения с начала 2000-х годов прослеживаются и в других регионах России [24]. Это может свидетельствовать о формировании новой тенденции изменения испарения с водной поверхности в последнее десятилетие.

Анализ коэффициента детерминации показал, что изменение скорости ветра объясняет более 50% дисперсии испарения с акватории озера, изменение дефицита влажности воздуха — чуть более 20%, а совместное влияние этих факторов — более 70%.

Наглядное представление о вкладе ветра и дефицита влажности воздуха в величину испарения дает также анализ месячных параметров линейных трендов для теплого периода года (таблица). Уменьшение испарения в теплый период в основном определяется заметным снижением скорости ветра. Увеличение дефицита влажности воздуха оказывает меньшее влияние на изменение испарения. Только в мае уменьшение дефицита влажности вносит некоторый вклад в уменьшение испарения.

### **Возможные изменения количества осадков и испарения в ближайшие десятилетия**

Модельные оценки изменения климатических характеристик в ближайшем будущем условны и зависят от используемых моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) и принятого сценария изменения климата [11, 28, 29]. Кроме того, большое распространение получил ансамблевый подход к модельным оценкам, позволяющий в значительной степени нивелировать недостатки каждой отдельной модели [11, 28].

В настоящее время для климатических прогнозов широко используют четыре сценария эмиссии парниковых газов: RCP2.6, RCP6, RCP4.5 и RCP8.5 [28]. Сценарий RCP2.6 разработан для условий значительного сокращения эмиссии парниковых газов. Для трех остальных сценариев RCP различия глобальной температуры к 2030—2045 гг., рассчитанной по любой модели, не превышают 0,2°C [18], что в 2 раза меньше межмодельного разброса, который для каждого из RCP составляет около 0,4°C [31]. Поскольку изменения температуры воздуха и количества осадков для наиболее агрессивного сценария — RCP8.5 [30] — максимальны, именно его было решено использовать для прогноза.

С помощью сценария эмиссии парниковых газов RCP8.5 и моделей поколения CLIMP5 [29] удастся оценить изменения сезонных и годовых сумм осадков в регионе расположения оз. Ханка. В ближайшие два-три десятилетия в Приморье можно ожидать увеличения количества годовых осадков на  $7 \pm 4\%$  [11] по сравнению с периодом 1981—2000 гг. Среднегодовая температура в этом регионе при этом может увеличиться на  $1,6 \pm 0,6^\circ\text{C}$  [11]. К середине XXI в. можно также ожидать повышения средней сезонной температуры поверхности воды на  $0,6—1,5^\circ\text{C}$ , увеличения среднегодового максимального парциального давления водяного пара на  $0,8—1,3 \text{ гПа}$  и среднегодовой абсолютной влажности воздуха на  $0,5—0,8 \text{ г/м}^3$ . Несмотря на значительный разброс модельных оценок, на основе результатов ансамбля моделей можно сделать вывод, что изменения облачности в целом за год к 2045 г. в районе оз. Ханка будут незначительны [11, 19, 20, 27].

Как результат всех этих изменений, увеличится среднегодовое значение дефицита влажности воздуха, и к середине XXI в. его величина может составить  $3,4—3,5 \text{ гПа}$ .

Прогноз скорости ветра представляет наибольшую сложность при использовании моделей. Даже ансамблевый подход, при котором расчеты по большому числу моделей усредняются и случайные ошибки компенсируются, не позволяет получить оценки, превышающие естественную межгодовую изменчивость скорости ветра [11, 29]. Именно поэтому для оценки скорости ветра часто используют оценки изменения атмосферного давления (барический градиент), хотя и они достаточно условны [19, 20]. Согласно [14, 19, 20], межгодовая изменчивость атмосферного давления в регионе расположения оз. Ханка к 2045 г. уменьшится не более чем на  $0,15 \text{ гПа}$ . При этом пространственный градиент практически не изменится. На основании этого можно сделать вывод, что к середине XXI в. среднегодовая скорость ветра составит  $3,3—3,5 \text{ м/с}$  при сохранении ее изменчивости, отмечаемой за последние два десятилетия.

Прогноз испарения с использованием МОЦАО практически невозможен вследствие большого разброса модельных оценок [11, 29], поэтому большинство прогнозов основано на оценке изменения метеорологических характеристик (как модельных оценок, так и эмпирических выводов), определяющих его величину и характер изменений.

Так, опережающий рост максимального парциального давления водяного пара по отношению к абсолютной влажности воздуха приведет к увеличению дефицита влажности воздуха. Рост дефицита влажности воздуха будет усиливать его влияние на увеличение испарения с акватории озера.

Продолжающееся незначительное уменьшение скорости ветра приведет к уменьшению испарения, однако его влияние будет меньше, чем для периода 1949—2015 гг.

Разнонаправленные изменения дефицита влажности воздуха и скорости ветра будут ограничивать рост величины испарения в будущем, поэтому к середине XXI в. изменения среднегодовой величины испарения будут минимальны ( $0,9—1,7\%$  от среднего за 1981—2000 гг.), несмотря на тенденцию к его увеличению в последнее десятилетие.

## Основные выводы

Водный режим оз. Ханка в значительной мере определяется соотношением осадков и испарения с его акватории. Уменьшение годовой величины испарения с водной поверхности оз. Ханка и увеличение годовых и, в особенности, летних осадков в последнее десятилетие во многом определяют современный подъем его уровня. При этом изменяется соотношение средних значений этих переменных: для периода 1949—2002 гг. годовые осадки составляли 625 мм, а годовое испарение — 677 мм, для периода 2002—2015 гг. годовая сумма осадков увеличилась до 656 мм, испарение уменьшилось до 618 мм. Положительная разность между осадками и испарением является одной из существенных причин повышения уровня озера. Следует также отметить, что основной вклад в величину испарения в целом за год вносит испарение с открытой водной поверхности (т. е. за теплый период года), а летние осадки во многом определяют их годовую сумму.

При этом уменьшение годовой величины испарения с акватории оз. Ханка на фоне повышения температуры воздуха и количества атмосферных осадков в Приморье полностью соответствует отмеченному в большинстве регионов земного шара явлению “парадокса испарения” [27].

Взаимный анализ рядов испарения и метеорологических факторов, оказывающих влияние на его величину и межгодовые изменения, позволил выявить среди них наиболее значимые. Оказалось, что изменения скорости ветра и дефицита влажности воздуха в наибольшей степени определяют режим испарения с поверхности оз. Ханка: изменение скорости ветра объясняет более 50% дисперсии испарения с акватории озера, а дефицит влажности воздуха — чуть более 20%, совместное влияние этих факторов — более 70%. Таким образом, существенное уменьшение испарения с поверхности оз. Ханка в основном связано с уменьшением скорости ветра в районе озера.

К середине XXI в. можно ожидать увеличения количества осадков в Приморье, в частности на акватории оз. Ханка, на  $7 \pm 4\%$  [11] по сравнению с базовым периодом 1981—2000 гг. в основном из-за увеличения осадков в теплый период [18]. При этом на фоне повышения температуры воздуха увеличится также дефицит влажности воздуха (на  $6 \pm 2\%$ ), а скорость ветра уменьшится примерно на такую же величину (не более чем на  $5 \pm 2\%$ ) по сравнению с базовым периодом.

Разнонаправленные изменения дефицита влажности воздуха и скорости ветра будут ограничивать увеличение испарения в будущем, поэтому даже при сохранении тенденции к росту годовой величины испарения с 2000 г. его изменения будут незначительны (порядка 1%) по сравнению со средним значением за 1981—2000 гг. (638 мм). Кроме того, рост величины испарения начинается с минимального среднего значения (613 мм) за период 2002—2015 гг.

При таких изменениях основных элементов водного режима озера (осадков и испарения) не следует ожидать существенного изменения его уровня вследствие естественных климатических процессов.

Дальнейшее усовершенствование методов оценки испарения и его изменений в будущем тесно связано с развитием региональных моделей климата, в которых можно точнее учитывать взаимодействие различных природных процессов в разных природных зонах.

## Литература

1. **Ананьева Е. Е.** Озеро Ханка: колебания уровня и их причины. — Астраханский вестник экологического образования, 2016, № 4 (38), с. 48—57.
2. **Баранова А. А., Голод М. П., Мешерская А. В.** Изменение градуированных скоростей ветра на территории России во второй половине XX века. — Труды ГГО, 2007, вып. 556, с. 116—138.
3. **Боргин Н. Н., Горчаков А. М.** Причины экстремально высокого уровня воды трансграничного озера Ханка. — Водное хозяйство России, проблемы, технологии, управление, 2016, № 4, с. 62—84.
4. **Булыгина О. Н., Коршунова Н. Н., Разуваев В. Н.** Изменение режима ветра на территории России в последние десятилетия. — Труды ГГО, 2013, вып. 568, с. 156—172.
5. **Васьковский М. Г.** Гидрологический режим озера Ханка. — Л., Гидрометеоздат, 1978, 175 с.
6. **Васьковский М. Г.** К расчету водного баланса оз. Ханка. — Труды ДВНИГМИ, 1970, вып. 31, с. 54—62.
7. **Водные ресурсы и водный баланс территории Советского Союза.** — Л., Гидрометеоздат, 1967, 200 с.
8. **Водные ресурсы и их использование, ГВК, ДСП № 1985.** — Л., Гидрометеоздат, 1987, 303 с.
9. **Водные ресурсы России и их использование.** /Под ред. И. А. Шикломанова. — СПб, Государственный гидрологический институт, 2008, 600 с.
10. **Водные ресурсы СССР и их использование.** — Л., Гидрометеоздат, 1987, 302 с.
11. **Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации.** / Науч. рук. В. М. Катцов, С. М. Семенов — М., Росгидромет, 2014, 1008 с. (электронный ресурс).
12. **Георгиевский В. Ю., Шалыгин А. О., Болгов М. В., Корбуина Е. А.** Многолетние изменения уровня озера Ханка и проблемы его регулирования. — Водное хозяйство России, 2017, № 3, с. 69—88.
13. **Меженная И. В.** Опыт применения метода теплового баланса для расчета испарения с поверхности оз. Ханка. — Труды ДВНИГМИ, 1988, вып. 135, с. 44—47.
14. **Мелешко В. П., Катцов В. М., Говоркова В. А., Спорышев П. В., Школьник И. М., Шнееров Б. Е.** Климат России в XXI веке. Часть 3. Будущие изменения климата, рассчитанные с помощью ансамбля моделей общей циркуляции атмосферы и океана СМIP3. — Метеорология и гидрология, 2008, № 4, с. 5—21.
15. **Методы изучения и расчета водного баланса.** /Под ред. А. А. Соколова. — Л., Гидрометеоздат, 1981, 397 с.
16. **Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли.** /Под ред. В. И. Корзун. — Л., Гидрометеоздат, 1974, 637 с.
17. **Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Том 1.** Вып. 21. Бассейны Уссури и рек Японского моря. — Л., Гидрометеоздат, 1986, 387 с.
18. **Научные исследования по изучению гидрологических особенностей водного режима озера Ханка в целях определения причин аномального повышения уровня воды и выработки научно-обоснованных предложений по регулированию уровня воды в озере, формированию комплекса мер по снижению негативного воздействия вод озера на территории Приморского края. Ч. 1: Отчет о НИР (промежуточный).** /Рук. В. Ю. Георгиевский. № ГР АААА-А16-116060710003-5; Инв. № 515- НИР. — СПб, ГГИ, 2016, 296 с.
19. **Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том I. Изменения климата.** — М., Росгидромет, 2008, 227 с.
20. **Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том II. Последствия изменений климата.** — М., Росгидромет, 2008, 288 с.
21. **Постников А. Н.** Оценка норм испарения за безледоставный период с озер и водохранилищ России и отдельных стран СНГ методом теплового баланса. — Ученые записки РГГМУ, 2012, № 26, с. 25—33.
22. **Рекомендации по расчету испарения с поверхности суши.** — Л., Гидрометеоздат, 1976, 96 с.
23. **Серпик Б. И.** Водные ресурсы рек Южного Приморья Дальнего Востока. — Л., Гидрометеоздат, 1955, 177 с.
24. **Сперанская Н. А.** Потенциально возможное и видимое испарение и его изменения на Европейской части России за последние 50 лет (по экспериментальным данным). — Водные ресурсы, 2016, т. 43, № 6, с. 661—672.

25. **Указания** по расчету испарения с поверхности водоемов. — Л., Гидрометеоздат, 1969, 83 с.
26. **Юргенсон Р. О.** О судоходном состоянии реки Амура с притоками. — Зап. Приамурское отд. ИРГО, 1897, т. 3, вып. 2, с. 1—100.
27. **IPCC, Climate Change 2007:** The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. /S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, H. L. Miller (eds.). — Cambridge, UK, Cambridge University Press, 996 p.
28. **IPCC, Climate Change 2013:** The Physical Science Basis. Contributing of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. /T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, et al. (eds.) — Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 1535 p.
29. **IPCC, Climate Change 2014:** Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. /Core Writing Team, R. K. Pachauri, and L. A. Meyer (eds.). — Geneva, 2014, 151 p.
30. **Riahi K., Rao S., Krey V., et al.** RCP 8.5 — A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. — Climatic Change, 2011, vol. 109, pp. 33—57.
31. **Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K., et al.** Technical Summary. /In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. — Cambridge, Cambridge University Press, pp. 33—115.

Поступила в редакцию 17 VII 2017 г., после доработки 17 X 2017 г.

## LONG-TERM CHANGES IN MAIN COMPONENTS OF LAKE KHANKA WATER REGIME

N. A. Speranskaya and T. V. Fuksova

*The results of analysis of changes in annual total precipitation and annual pan evaporation for the Lake Khanka water area during the period of 1949–2015 based on observational data of weather stations within the lake basin are presented. The reliability of calculated values of characteristics affecting evaporation changes was corroborated by their comparison with observations in the 20-m<sup>2</sup> evaporation pan installed at Astrakhanka lake station. It is shown that against a background of significant interannual fluctuations of annual precipitation during the whole period under study, its trends are almost absent. However, a rather stable increase in precipitation value caused by the summer precipitation rise has been registered since the early 2000s. The value of annual pan evaporation decreased from 1949 to 2015, and the rate of its decrease till 1980 was higher than in the next period; the certain increase in evaporation has been observed in the recent decade. The main contribution to the evaporation change is made by wind speed changes which cause about 50% of evaporation variance. It is demonstrated that the increase in annual precipitation is possible by the middle of the 21st century, while the change in annual evaporation from the Lake Khanka water area would be minimal. Under such changes in the main components of lake water regime, no reduction of its level due to natural climate processes should be expected.*

## К вопросу об оценке методик краткосрочного прогноза гидрологических величин

А. А. Соколов\*, А. Н. Бугаец\*\*,\*\*\*

*Рассмотрены основные положения существующей методологии оценки прогностических методик в отсутствие влияния объема выборки на точность определения статистических параметров. Предложен метод оценки, сравнения и выбора прогностических методик, основанный на учете инерции прогнозируемого явления и позволяющий создавать оптимальные схемы выпуска прогнозов с учетом приоритетности ожидаемых параметров точности и оправдываемости прогнозов. Ожидается, что полученные авторами статьи результаты найдут широкое применение в практике гидрологического прогнозирования.*

**Ключевые слова:** краткосрочные гидрологические прогнозы, методика, оценка, инерция, эффективность, точность, оправдываемость.

### Введение

Развитие сети гидрометеорологических наблюдений путем увеличения числа автоматических метеорологических и гидрологических комплексов, ежедневно передающих информацию о состоянии водных объектов, и развитых систем мониторинга и управления данными [4, 10] позволяет разрабатывать и автоматизировать не только методики краткосрочного прогноза, но и так называемые сверхкраткосрочные прогнозы [5]. Современные технические решения и программные стандарты обеспечивают создание новых методик прогнозирования — от простых эмпирических формул до сложных интегрированных систем, объединяющих геоинформационные системы, базы данных, физико-математические модели стока, численные модели атмосферы и т. п. [4]. Однако развитие этого направления сдерживается из-за устаревшей методологической базы оценки прогностических методик [7]. За более чем 50 лет опубликована только одна работа [3], авторы которой предлагают устранить недостатки и привести правила оценки эффективности и качества прогнозов в соответствие с современным уровнем развития гидрологии, математической статистики и вычислительной техники.

В статье предлагается способ решения задачи оценки прогностических методик и вопроса назначения допустимой погрешности с помощью численной оценки инерционных свойств водного объекта и установление на его основе критериев оценки вновь разрабатываемых методик, позволяющих реагировать

\*Приморское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды; e-mail: sokolov-aa@meteoprim.ru.

\*\*Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения Российской академии наук.

\*\*\* Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт.

на требования потребителей к заблаговременности, точности и оправдываемости прогнозов.

### Основные положения

Основными критериями оценки любой методики прогнозирования являются точность и эффективность [1, 7], зависящие от изменчивости прогнозируемой гидрологической величины, которая в разных обстоятельствах может быть принята с учетом нормы или периода заблаговременности прогноза. Отдельно выделяются особые случаи применения критериев оценки при высокой инерционности прогнозируемого явления, для которой нет четкого количественного определения. Под термином “гидрологическая величина” следует понимать наблюдаемые или измеряемые характеристики гидрологического процесса, режима или явления в конкретном створе. Представим гидрологическую величину  $x$ , ее прогностическое значение  $y$  (в каждый момент времени  $t$  величине  $x_t$  соответствует величина  $y_t$ ) и разность между ними  $\delta = x - y$  как случайные величины. Предположим, что длина ряда  $x$  достаточна, чтобы пренебречь влиянием ограниченности размера выборки, и рассмотрим упомянутые выше критерии для указанного случая.

Согласно [7], для оценки эффективности прогностической методики используется отношение среднеквадратической погрешности прогноза  $S_{xy}$  (индекс  $xy$  обозначает разность между расчетной  $y$  и фактической  $x$  величинами) и среднеквадратического отклонения  $x$  от нормы  $\sigma_x$  или на протяжении периода заблаговременности прогноза  $\sigma_\Delta$  (индекс  $\Delta$  обозначает период заблаговременности прогноза) в зависимости от того, какая из этих величин меньше:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (1)$$

$$\sigma_\Delta = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (\Delta_t - \bar{\Delta})^2}{n-1}}. \quad (2)$$

Здесь  $\bar{x}$  — математическое ожидание  $x$ ;  $n$  — длина ряда;  $\Delta_t$  — разность между конечным  $x_t$  и начальным  $x_{t-\Delta}$  значениями за период заблаговременности прогноза;  $\bar{\Delta}$  — норма этой разности.

Точность методики прогноза зависит от интервала неопределенности, задаваемого размером допустимой погрешности прогноза  $\delta_{\text{доп}}$ , в качестве которой принимается равновероятное отклонение гидрологической величины от нормы. Предполагается, что гидрологическая величина имеет приближенно нормальное распределение, в результате чего в качестве “равновероятного отклонения” принимается значение  $\delta_{\text{доп}} = 0,674\sigma_x$  (или  $0,674\sigma_\Delta$ ) и условие минимального критерия эффективности  $S_{xy}/\sigma_x$  (или  $S_{xy}/\sigma_\Delta$ )  $< 0,8$  [1, 2, 6—8].

Априори считается, что величина погрешности прогноза  $\delta$  также подчиняется нормальному (гауссову) распределению с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением, равным  $S_{xy}$ :  $\delta \in N(0, S_{xy})$ . С точки зрения генеральной совокупности величина  $S_{xy}^2$  может быть описана как

$$S_{xy}^2 = M(\delta^2) = M(x - y)^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 - 2 \text{Cov}(x, y), \quad (3)$$

где  $M(\delta^2)$  — математическое ожидание  $\delta^2$ ,  $\sigma_x^2$  и  $\sigma_y^2$  — дисперсии величин  $x$  и  $y$  соответственно;  $\text{Cov}(x, y)$  — ковариация этих величин.

Предположим, что прогностическая методика настолько хорошо описывает фактическую величину, что статистические параметры  $x$  и  $y$  близки, а  $\sigma_y \approx \sigma_x$ . Используя определение коэффициента корреляции как нормированную

на среднеквадратические отклонения ковариацию этих же величин  $\frac{\text{Cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y}$ , приведем выражение (3) к следующему виду:

$$S_{xy}^2 = \sigma_x \sigma_y \left( \frac{\sigma_x}{\sigma_y} + \frac{\sigma_y}{\sigma_x} - 2R_{xy} \right) = \sigma_x^2 (1 + 1 - 2R_{xy}) = 2\sigma_x^2 (1 - R_{xy}), \quad (4)$$

где  $R_{xy}$  — коэффициент корреляции между прогностической  $y$  и фактической  $x$  величинами.

Тогда базовая характеристика оценки прогностической методики  $S_{xy}$  будет иметь вид

$$S_{xy} = \sqrt{2} \sigma_x \sqrt{1 - R_{xy}}. \quad (5)$$

Применение методики в оперативной практике может считаться оправданным, если она лучше так называемого инерционного прогноза, не учитывающего факторы формирования стока [3]. Рассмотрим инерционные свойства прогнозируемой гидрологической характеристики на примере анализа простейшей авторегрессионной модели, основанной на предположении о равенстве текущего значения гидрологической величины ее предшествующему значению, отстоящему во времени на период заблаговременности прогноза  $\Delta$ . Сопоставим величину  $x_t$  и ее прогнозируемое значение  $y_t$ , рассчитываемое по формуле  $y_t = x_{t-\Delta}$ . Аналогично рассуждению при выводе уравнения (5) найдем, что среднеквадратическое отклонение  $S_\Delta$  (индекс  $\Delta$  свидетельствует о временной составляющей) ошибки прогноза  $\delta_t = x_t - y_t = x_t - x_{t-\Delta}$  равно

$$S_\Delta = \sqrt{2} \sigma_x \sqrt{1 - R_\Delta}, \quad (6)$$

где  $R_\Delta$  означает коэффициент автокорреляции исходной величины со значениями, сдвинутыми на период заблаговременности  $\Delta$ .

Выражения (5) и (6) различаются лишь коэффициентами  $R_{xy}$  и  $R_\Delta$ . Первый коэффициент характеризует взаимосвязь измеренной величины с расчетной, где в качестве предикторов использованы величины, разнесенные относительно местоположения пункта прогноза в пространстве и во времени. Второй коэффициент учитывает, что обе коррелируемые величины расположены в одной точке пространства и разнесены относительно друг друга лишь во времени (на период  $\Delta$ ). В последнем случае “значение на начало...” и “значение на конец периода заблаговременности” [7] — это случайные величины одной и той же генеральной совокупности, их средние значения должны совпадать, а норма их разности  $\bar{\Delta}$ , входящая в уравнение (2), должна равняться нулю. Тогда

$$\sigma_\Delta^2 = M(x - y)^2. \quad (7)$$

По аналогии с выводом для  $S_{xy}$  и  $S_\Delta$  последнее выражение приводится к виду

$$\sigma_\Delta = \sqrt{2} \sigma_x \sqrt{1 - R_\Delta}. \quad (8)$$

Сравнение выражений (6) и (8) позволяет сделать вывод, что изменчивость за период заблаговременности  $\sigma_\Delta$  является среднеквадратичной погрешностью инерционного прогноза  $S_\Delta = \sigma_\Delta$  (для которого  $S_{xy} / \sigma_\Delta = S_{xy} / S_\Delta$ ).

### Обсуждение результатов

Исходя из установленных выше выражений (5) и (8) критерий качества прогностической методики, учитывающий изменчивость за период заблаговременности (отношение  $S_{xy}/\sigma_{\Delta}$ ), зависит только от отношения коэффициентов  $R_{xy}$  и  $R_{\Delta}$ :

$$\frac{S_{xy}}{\sigma_{\Delta}} = \frac{\sqrt{2}\sigma_x\sqrt{1-R_{xy}}}{\sqrt{2}\sigma_x\sqrt{1-R_{\Delta}}} = \sqrt{\frac{1-R_{xy}}{1-R_{\Delta}}}. \quad (9)$$

В случае близости  $R_{xy} \approx R_{\Delta}$  критерий эффективности будет стремиться к единице (рис. 1). В подобных ситуациях при разработке прогностической методики для нижележащего створа с использованием информации от вышележащего створа аналогичность условий формирования водного режима обуславливает высокую корреляционную связь  $R_{xy}$  между соответствующими величинами. Если при этом степень инерционности гидрологического режима высока (что определяет высокое значение  $R_{\Delta}$ ), то неизбежно возникает ситуация, когда оба коэффициента принимают близкие значения, и  $R_{xy}$  практически представляет собой линейное преобразование  $R_{\Delta}$  вышележащего створа. Очевидно, что круг явлений, для которых  $R_{xy} \approx R_{\Delta}$  и  $S_{xy}/\sigma_{\Delta} \approx 1$ , весьма широк. С одной стороны, точность прогнозов, основанных на использовании инерционных свойств водных объектов, может быть вполне приемлемой с точки зрения потребителя, но, с другой стороны, существующий критерий может признать их качество неудовлетворительным, что вынуждает отказываться от их использования.

Критерием оценки возможности разработки новой методики может быть построенная на основе выражения (6) эмпирическая функция  $S_{\Delta} = f(\Delta)$ , характеризующая точность инерционного прогноза. Данная функция должна использоваться в качестве верхней границы точности для любой разрабатываемой прогностической методики во всем диапазоне заблаговременности, т. е. для любой заблаговременности должно соблюдаться следующее требование:  $S_{xy} < S_{\Delta}$  (или  $R_{xy} > R_{\Delta}$ ). Разрабатываемая методика должна быть лучше инерцион-

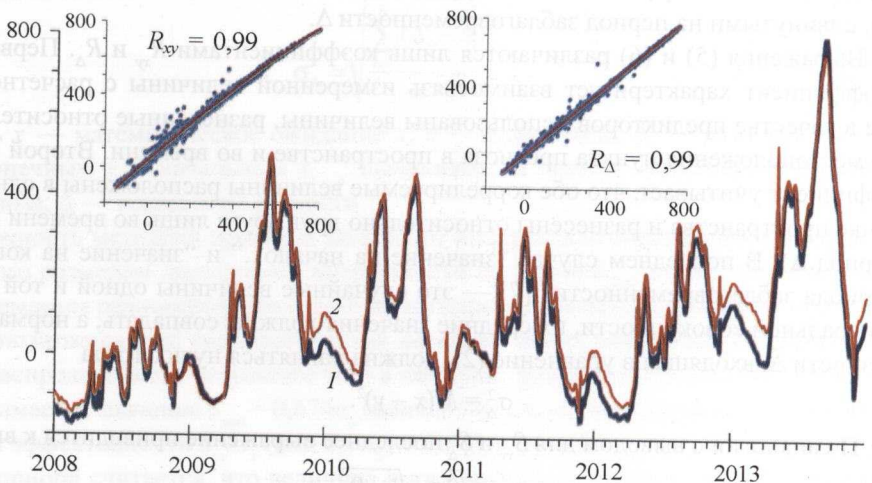


Рис. 1. Графики совмещенных уровней воды для гидрологических постов р. Амур — г. Хабаровск (5012; 1) и р. Амур — п. Елабуга (5016; 2) за теплый (апрель — октябрь) период года.

Расстояние между створами — 91 км,  $\Delta = 1$  сут,  $R_{xy} = 0,99$ ,  $R_{\Delta} = 0,99$ ,  $S_{xy} = 20$  см,  $S_{\Delta} = 15,5$  см,  $\sigma_{\Delta} = 15,4$  см,  $\delta_{\text{доп}} = 0,674 \sigma_{\Delta} = 10,4$  см,  $S_{xy}/\sigma_{\Delta} = 1,3$ .

ного прогноза, в противном случае следует использовать простую авторегрессионную модель.

Значение  $\delta_{\text{доп}}$ , обеспечивающее необходимую оправдываемость прогностической методики, может быть установлено с помощью квантиля распределения Гаусса

$$\delta_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} S_{xy}, \quad (10)$$

где  $k_{\text{доп}}$  — квантиль стандартного нормального распределения.

Принятие установленной выше погрешности прогноза в качестве допустимой обеспечит оправдываемость прогнозов  $P$  на уровне

$$P(-\delta_{\text{доп}} \leq \delta \leq \delta_{\text{доп}}) = \int_{-\delta_{\text{доп}}}^{+\delta_{\text{доп}}} p(\delta) d\delta, \quad (11)$$

где  $p(\delta)$  — описываемая функцией Гаусса плотность распределения  $\delta$ .

Однако в качестве заданной может выступить величина оправдываемости. Заменим переменную  $\delta$  ее нормализованной формой

$$k = \delta/S_{xy}. \quad (12)$$

Переменная  $k$  в выражении (12) — случайная величина, вероятность которой имеет нормальное распределение:  $k \in N(0, 1)$ . Допустимой погрешности  $\delta_{\text{доп}}$ , согласно выражению (12), соответствует  $k_{\text{доп}} = \delta_{\text{доп}}/S_{xy}$ . Используя это определение, приведем уравнение (11) к следующему виду:

$$P(-k_{\text{доп}} \leq k \leq k_{\text{доп}}) = \int_{-k_{\text{доп}}}^{+k_{\text{доп}}} p(k) dk = F(k_{\text{доп}}) - F(-k_{\text{доп}}), \quad (13)$$

где  $p(k)$  — функция Гаусса, описывающая плотность распределения вероятности случайной величины  $k$ ;  $F$  — значение стандартной интегральной функции Гаусса для аргумента  $k$ .

Последние слагаемые в выражении (13) в гидрологической практике принято называть термином “обеспеченность”. Если в качестве допустимого принять значение  $k_{\text{доп}} = 1,96$  (которому соответствует  $\delta_{\text{доп}} = 1,96 \cdot S$ ), то оправдываемость прогностической методики составит  $100\% \cdot (F(1,96) - F(-1,96)) = 97,5\% - 2,5\% = 95\%$ .

Данный подход позволяет решать разные задачи — как при оценке существующей методики прогноза, так и при анализе требований при проектировании новой. Например, если важна точность прогноза, то сначала следует назначать величину максимально допустимой погрешности. В противном случае предварительно требуется назначать величину минимально приемлемой оправдываемости. Наконец, может производиться сравнение параметров методики с параметрами прогноза, выдвигаемыми его потребителем (заказчиком). В этом случае наилучшее сочетание точности и оправдываемости не является обязательным, достаточно иметь методику, отвечающую требованиям заказчика. Поэтому в данном случае критерием оценки при выборе методики могут служить другие ее свойства — например, экономические (стоимость обслуживания методики, стоимость получения данных о предикторах и т. д., подобные примеры из практики гидрологического прогнозирования приводятся в работе [3]). В ряде случаев оправданным может оказаться переход к менее точной, но более простой, устойчивой и более дешевой методике [3, 9].

Следует отметить, что в практике гидрологического прогнозирования нередко возникают ситуации, когда для одной и той же характеристики могут использоваться несколько методик прогноза с одинаковой заблаговременностью. Они могут различаться составом предикторов, схемой получения прогнозов,

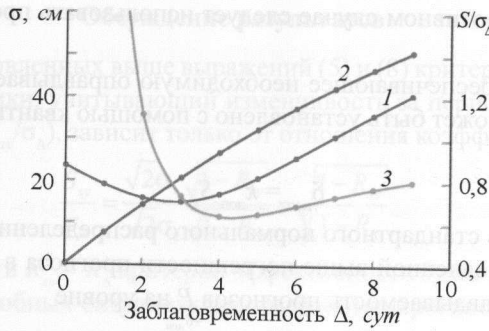


Рис. 2. Пример анализа методики краткосрочного прогноза методом соответственных уровней р. Усури для створов п. Кировский — г. Лесозаводск с помощью зависимостей  $S_{xy}(\Delta)$  (1),  $S_{\Delta}(\Delta)$  (2) и  $S/\sigma_{\Delta} = f(\Delta)$  (3).

составом параметров и т. д. Применительно к рассматриваемому в статье случаю — разработке новой или оценке старой методики прогноза — необходимо рассчитать зависимость  $S_{\Delta} = f(\Delta)$  и проверить достоверность выполнения условия  $S_{xy} < S_{\Delta}$  для каждого периода заблаговременности прогноза  $\Delta$ . Затем для каждого периода  $\Delta$  назначить величину оправдываемости  $P$  или  $\delta_{\text{доп}}$ . Графики зависимостей  $S_{xy} = f(\Delta)$  прогностических методик должны располагаться ниже линии графика инерционного прогноза  $S_{\Delta} = f(\Delta)$ . Для прогноза с заблаговременностью  $\Delta$  следует выбирать методику с минимальным (или минимально достаточным) значением  $S_{xy}$ . Ожидаемую оправдываемость, как показано выше, можно рассчитать заблаговременно по известным значениям среднеквадратичной ошибки методики и допустимого отклонения. При сравнении методик прогноза (одинаковой заблаговременности для одного и того же водного объекта) критерием оценки может служить лучшая точность методики при равной оправдываемости либо лучшая оправдываемость при одинаковой точности.

В качестве примера рассмотрим процедуру построения методики краткосрочного прогноза ежесуточного уровня воды методом соответственных уровней р. Усури для створа у г. Лесозаводск (предиктор — данные створа у п. Кировский) за период открытого русла. В качестве исходных были использованы данные о ежедневных уровнях в указанных створах в период 2010—2014 гг. Анализ зависимостей  $S_{xy}(\Delta)$  и  $S_{\Delta}(\Delta)$  (рис. 2) свидетельствует о том, что прогноз методом соответственных уровней при заблаговременности менее двух суток хуже авторегрессионного. На этот период заблаговременности следует использовать методику, имеющую преимущество перед инерционным прогнозом, либо использовать прогноз, основанный на инерционных свойствах водного объекта.

Таким образом, использование альтернативной схемы оценки, сравнения и выбора методик во всем диапазоне заблаговременностей, основанной на учете инерции прогнозируемого явления, еще на стадии ее разработки позволит учесть специфику применения прогностической методики при решении водохозяйственных задач (в том числе с учетом требований потребителей), составить разные варианты оптимального выпуска прогнозов исходя из приоритетности ожидаемых параметров точности и оправдываемости.

## Литература

1. Аполлов Б. А., Калинин Г. П., Комаров В. Д. Курс гидрологических прогнозов. — Л., Гидрометеиздат, 1974, 422 с.
2. Бефани А. Н., Калинин Г. П. Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам. — Л., Гидрометеиздат, 1965, 441 с.
3. Борщ С. В., Христофоров А. В. Оценка качества прогнозов речного стока. — Труды Гидрометцентра России, 2015, вып. 355.
4. Бугаец А. Н., Гончуков Л. В., Соколов О. В., Гарцман Б. И., Краснопеев С. М. Автоматизированная информационная система гидрологического мониторинга и управления данными. — Метеорология и гидрология, 2017, № 3, с. 103—113.
5. Виноградов Ю. Б., Виноградова Т. А. Прикладная гидрология. — СПб, СПбГЛТУ, 2014, 196 с.
6. Георгиевский Ю. М., Шаночкин С. В. Гидрологические прогнозы. — СПб, РГГМУ, 2007, 436 с.
7. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Служба гидрологических прогнозов. Часть 1. Прогнозы режима вод суши. — Л., Гидрометеиздат, 1952.
8. Попов Е. Г. Основы гидрологических прогнозов. — Л., Гидрометеиздат, 1968, 294 с.
9. Руководство по гидрологической практике. Сбор и обработка данных, анализ, прогнозирование и другие применения. — ВМО-0168, 1994, 808 с.
10. Фролов А. В., Асмус В. В., Борщ С. В., Вильфанд Р. М., Жабина И. И., Затягалова В. В., Кровотынцев В. А., Кудрявцева О. И., Леонтьева Е. А., Симонов Ю. А., Степанов Ю. А. «ГИС Амур»: система мониторинга, прогнозирования и раннего оповещения о наводнениях. — Метеорология и гидрология, 2016, № 3, с. 5—21.

Поступила в редакцию 28 IV 2017 г.

## TO THE PROBLEM OF VERIFICATION OF METHODS FOR SHORT-RANGE FORECASTING OF HYDROLOGICAL PARAMETERS

A. A. Sokolov and A. N. Bugaets

*The main principles of the existing methodology for the verification of forecasting techniques in the absence of the sample volume impact on the accuracy of determination of statistical parameters are considered. A method is proposed for the verification, comparison, and selection of forecasting methods. The method is based on the persistence of the predicted phenomenon and allows creating optimum forecast schemes with account of priority of expected parameters of accuracy. It is anticipated that the obtained results will be widely used in the practice of hydrological forecasting.*

## Общие черты формирования гидрохимического режима основных типов болот России

И. Л. Калужный\*

*Установлено, что химический состав вод всех типов болот России формируется под влиянием гидрометеорологического режима. В зимний период растущие кристаллы льда вытесняют в поровое пространство солевой раствор, увеличивая общую минерализацию болотных вод. Удельный прирост минерализации (в зависимости от типа болота) изменяется в пределах от 0,6—0,8 до 25 мг/дм<sup>3</sup> на 1 см промерзшего слоя. В период снеготаяния талые воды уменьшают общую минерализацию вод в 1,5—7,4 раза, приближая к уровню минерализации атмосферных осадков. В вегетационный период минерализация формируется под влиянием поглощения ионов растительностью и увеличения их содержания при распаде органики и испарения. Наибольшая пространственная изменчивость минерализации наблюдается в период наибольшей глубины промерзания (коэффициент вариации 0,48). При снеготаянии и в вегетационный период она уменьшается, и осенние осадки уменьшают ее до 0,07—0,08.*

**Ключевые слова:** болотные воды, гидрохимический и гидрометеорологический режимы, типы болот.

### Введение

Водно-минеральное питание болот является главным фактором, определяющим развитие болотной растительности и динамику болотной системы, а также интенсивность биохимических процессов в деятельном слое торфяной залежи. Определенное влияние на процессы формирования химического состава оказывает и гидрометеорологический режим болотного массива. В совокупности все эти процессы формируют химический состав и качество болотных вод. В настоящее время детально изучен химический состав вод олиготрофных и мезотрофных болот [2, 6], но влияние на процесс его формирования факторов гидрометеорологического режима является мало изученной областью гидрологии и гидрохимии. Между тем хозяйственное освоение всех типов болот на территории европейской и азиатской частей России требует информации о влиянии гидрометеорологических факторов на формирование гидрохимического режима и химического состава их вод. Для постановки и проведения такого рода исследований необходимы круглогодичные наблюдения за элементами гидрометеорологического режима и динамикой химического состава болотных вод. Комплексный анализ полученных результатов при таком решении поставленных вопросов является целью настоящей работы.

\* Государственный гидрологический институт; e-mail: hfi@mail.ru.

## Методика исследований

Исходной информацией для анализа динамики химического состава болотных вод и гидрометеорологического режима конкретных болотных массивов являются результаты наблюдений специализированной сети болотных станций Росгидромета. За период с 1970 по 2016 г. на специализированных болотных станциях использовали единую программу комплексных гидрометеорологических наблюдений и наблюдений за химическим составом болотных вод [7].

Отбор проб воды производили из разовой стандартной выемки размером  $20 \times 20$  см в плане и на глубине 10 см ниже уровня болотных вод. Далее пробы воды поступали в лаборатории территориальных УГМС, где с применением стандартных методов определялись основные компоненты химического состава болотных вод: главнейшие ионы  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ , а также фосфаты, кремний, железо, водородный показатель, перманганатная и бихроматная окисляемость. Общая минерализация определялась как сумма главнейших ионов и биогенных компонентов ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ).

Принятая методика позволяет рассматривать динамику химического состава болотных вод в неразрывной связи с факторами гидрометеорологического режима болот.

**Местоположение исследованных болот.** При выполнении настоящей работы в основном были использованы результаты наблюдений специализированной сети станций Росгидромета, расположенных на болотных массивах основных болотных провинций:

— Западносибирской провинции южной тайги, березовых лесов и евтрофных и мезотрофных болот с участием олиготрофных сосново-сфагновых, на болотах Тарманское и Баксинское;

— Даурско-Амурской провинции преимущественно горных лиственничников, частью сфагновых и сфагновых болот, на болоте без названия (названо Листвянским) [3];

— в провинции Финско-Кольской северной тайги и лапландских аапа, на мезоолиготрофном Пулозерском болоте, описание болота приведено в [2];

— Ладожско-Ильменско-Западнодвинской провинции широколиственно-хвойных лесов и выпуклых грядово-мочажинных болот, на олиготрофном болоте Ширинское;

— провинции средней тайги и выпуклых болот юго-востока Финляндии и Карельского перешейка, на олиготрофном болоте Ламмин-Суо, на болотной станции Зеленогорская [4];

— Прибеломорской провинции олиготрофных болот северной тайги, на болотном массиве Иласский, на болотной станции Брусовица;

— Западно-Сибирской провинции северной и средней тайги, олиготрофных грядово-мочажинных болот, на болотном массиве в районе оз. Самотлор;

— Эстоно-Литовской провинции выпуклых болот и широколиственных-хвойных лесов, на болотном массиве Тирели [6].

### Временная и пространственная изменчивость компонентов химического состава болотных вод под действием факторов гидрометеорологического режима болот

Под болотными водами, как водами местного стока, понимаются воды грунтового или атмосферного происхождения (или совместно того и другого), хи-

мический состав и концентрация компонентов которых изменились под влиянием произрастающей болотной растительности и биохимических процессов ее разложения.

Под их гидрохимическим режимом подразумевается временная изменчивость химического состава вод под воздействием факторов гидрологического и метеорологического режима болот.

Во всех типах болот гидрохимический режим имеет общие характерные черты. В поздний осенний и зимний периоды наблюдается увеличение общей минерализации, а следовательно, и компонентов химического состава, обусловленное вытеснением ионов из солевого раствора растущими кристаллами льда [2, 6]. Приращение общей минерализации зависит от ряда факторов, главным из которых является глубина промерзания, а косвенным — тип болотного массива. Так, на мезоолиготрофном болоте Пулозерское (табл. 1) за период наблюдений с 1979 по 1988 г. при средней минерализации, предшествующей промерзанию кустарничково-лишайникового микроландшафта, равной  $20 \text{ мг/дм}^3$ , ее приращение в конце зимы в среднем составило  $142,3 \text{ мг/дм}^3$  (в 7,1 раза). Средняя глубина промерзания за эти годы была  $54 \text{ см}$ , изменяясь при этом от  $43$  до  $67 \text{ см}$ . Удельный прирост минерализации в среднем составил  $2,33 \text{ мг/дм}^3$  на  $1 \text{ см}$  промерзшего слоя. В грядово-мочажинном комплексе он был несколько меньшим —  $1,75 \text{ мг/дм}^3$  на  $1 \text{ см}$ .

Для кустарничково-лишайникового микроландшафта мезоолиготрофного болота получена зависимость увеличения общей минерализации  $M_{об}$  ( $\text{мг/дм}^3$ ) от глубины промерзания болота  $h$  ( $\text{см}$ ) в виде уравнения

$$M_{об} = 19,49 e^{0,028h}$$

Ее коэффициент корреляции не превышает  $0,685$ , что свидетельствует о существовании и других факторов, воздействующих на происходящий процесс увеличения минерализации.

Зависимость значения общей минерализации от глубины промерзания хорошо проявляется на евтрофном Тарманском болоте (табл. 2). В гипново-осокном микроландшафте среднее значение минерализации в ноябре было равно  $823 \text{ мг/дм}^3$ ; за зиму оно увеличилось на  $258 \text{ мг/дм}^3$  и в марте — апреле установилось на уровне  $1081 \text{ мг/дм}^3$  (в 1,3 раза больше). В среднем по болоту за

Таблица 1

**Увеличение общей минерализации болотных вод кустарничково-лишайникового микроландшафта при промерзании мезоолиготрофного болота Пулозерское**

Зимний период, годы	Общая минерализация, $\text{мг/дм}^3$			Глубина промерзания, $\text{см}$	Удельное увеличение минерализации, $\text{мг/дм}^3$ на $1 \text{ см}$
	исходная	приращение	в конце зимы		
1979—1980	20,0	184,8	204,8	67	2,76
1981—1982	33,5	185,8	219,3	44	4,22
1982—1983	21,9	235,6	257,5	53	4,44
1983—1984	12,7	62,2	104,9	43	2,14
1984—1985	19,6	82,4	102,0	50	1,65
1985—1986	28,0	97,8	125,8	57	1,72
1986—1987	21,0	42,4	63,4	65	0,65
1987—1988	8,3	52,6	60,9	50	1,05
Среднее	20,6	117,9	142,3	54	2,33

Таблица 2

Средние месячные значения общей минерализации ( $мг/дм^3$ ) болотных вод при промерзании и оттаивании мерзлого слоя на евтрофном болотном массиве Тарманское

Микроландшафт	Осенне-зимний период			После снеготаяния	
	$M_{oc}$	$\Delta M_z$	$M_{пр}$	$M_n$	$\gamma$
Осоковый кочкарник	812	197	1009	595	1,70
Гипново-осоковый	823	258	1081	574	1,88
Грядово-мочажинный	567	194	761	379	2,01
Осоково-гипновый	650	235	885	539	1,64
Среднее по болоту	713	221	934	522	1,80

*Примечание.* Здесь и в табл. 3  $M_{oc}$  — осенняя минерализация;  $\Delta M_z$  — зимнее приращение;  $M_{пр}$  — минерализация в период, предшествующий снеготаянию;  $M_n$  — весенняя минерализация;  $\gamma$  — степень разбавления.

многолетний период наблюдений зимнее приращение общей минерализации составляет  $221 мг/дм^3$  [5].

Расчеты показывают, что в осоковом кочкарнике удельный прирост минерализации равен в среднем  $25 мг/дм^3$  при увеличении промерзания на  $1 см$ , в осоково-гипновом —  $14,9 мг/дм^3$  на  $1 см$ , что существенно больше, чем на мезоолиготрофном болоте.

Зависимость общей минерализации, наблюдаемой на Тарманском болоте в период, предшествующий снеготаянию ( $M_{пр}$ ,  $мг/дм^3$ ), от величины минерализации в осенний период ( $M_{oc}$ ,  $мг/дм^3$ ) перед промерзанием болота выражается уравнением вида

$$M_{пр} = 0,982 M_{oc} + 304$$

при коэффициенте корреляции  $R = 0,79$ .

На евтрофном Листвянском болоте (осоково-гипновый микроландшафт) в предзимний период общая минерализация составила  $81,8 мг/дм^3$  и за зиму под влиянием промерзания увеличилась до  $148,0 мг/дм^3$ , т. е. на  $66,2 мг/дм^3$ , или на 81% первоначальной величины.

На олиготрофных болотах также наибольшая минерализация наблюдается при наибольшей глубине промерзания [6]. На болоте Тирели в сфагново-пушицево-кустарничковом микроландшафте в предзимнем периоде она была равна  $23,7 мг/дм^3$  и при глубине промерзания  $40 см$  возросла до  $58,6 мг/дм^3$  (в 2,5 раза). В среднем удельный прирост составляет  $0,6—0,8 мг/дм^3$  на  $1 см$  промерзшего слоя.

На олиготрофном болоте Иласское, в грядово-мочажинном комплексе (табл. 3), по результатам наблюдений с 1978 по 1988 г. среднее значение общей минерализации предзимнего периода составило  $17,2 мг/дм^3$ . За зимний период она увеличилась на  $16,9 мг/дм^3$  и достигла  $34,2 мг/дм^3$ , т. е. увеличилась практически на 98%.

Отсюда следует, что независимо от типа болотного массива промерзание торфяной залежи обуславливает увеличение общей минерализации, и в предпаводочный период она становится существенно больше по сравнению со значениями в позднесенний период.

Весной под влиянием таяния слабоминерализованного снежного покрова и талых вод мерзлого слоя с существенно пониженной минерализацией происходит разбавление раствора солей, и минерализация его резко снижается. В

Таблица 3

Суммарное содержание главных ионов в водах грядово-мочажинного комплекса в предзимний, зимний и весенний периоды на олиготрофном Иласском болоте

Годы	Общая минерализация, мг/дм <sup>3</sup>				γ
	$M_{oc}$	$\Delta M_3$	$M_{пр}$	$M_v$	
1978—1979	16,2	18,2	34,4	19,5	1,8
1979—1980	12,7	20,9	33,6	6,6	5,1
1980—1981	10,9	6,3	17,2	8,5	2,0
1982—1983	15,2	19,0	34,2	19,0	1,8
1983—1984	26,2	11,0	37,2	12,7	2,9
1984—1985	17,7	40,4	58,1	15,3	3,8
1986—1987	20,0	10,0	30,0	19,3	1,6
1987—1988	19,0	9,5	28,5	11,4	2,5
Среднее	17,2	16,9	34,2	14,0	2,6

среднем за многолетний период наблюдений на евтрофном Тарманском болоте она уменьшается с 992 до 647 мг/дм<sup>3</sup> (в 1,5 раза) и менее, на Листвянском — от 297 до 40 мг/дм<sup>3</sup> (в 7,4 раза). На мезоолиготрофном Пулозерском болоте при средней многолетней минерализации атмосферных осадков, равной 10 мг/дм<sup>3</sup>, общая минерализация в мае достигает 7,2—10,0 мг/дм<sup>3</sup>, т. е. минерализация болотных вод становится близка к минерализации атмосферных осадков.

На олиготрофном Самогторском болоте наименьшая минерализация наблюдается в весенний период — от 10 до 15 мг/дм<sup>3</sup>, что соответствует минерализации осадков (5—8 мг/дм<sup>3</sup>). На этом массиве, а также на всех олиготрофных болотах талые воды стекают от центра к окраине, и концентрация ионного состава становится практически одинаковой.

В начале вегетационного периода и до наступления межени минерализация увеличивается равномерно вследствие концентрации солевого состава под влиянием испарения. Уровень болотных вод понижается, их сток уменьшается, и, как следствие, уменьшается их вынос за пределы болота. Общая минерализация на начальном этапе меженного периода относительно небольшая и зависит от степени разбавления болотных вод тальми. На олиготрофных болотах Тирели и Ламмин-Суо она равна 8—18 мг/дм<sup>3</sup>.

Далее происходит увеличение концентрации солевого раствора в основном под влиянием двух разнонаправленных процессов: поглощения минеральных компонентов произрастающей растительностью и увеличения их содержания под влиянием распада органики и испарения.

С целью оценки влияния испарения на увеличение общей минерализации были поставлены соответствующие опыты на евтрофном болотном массиве Лунинское. На двух болотных весовых испарителях ГГИ-Б-1000, установленных в осоково-гипновом микроландшафте, проводилось измерение испарения с поверхности болота от начала вегетационного сезона (30 апреля) до его окончания (5 октября) по методике, изложенной в Наставлении [7]. При этом в процессе опыта при уменьшении уровня воды в испарителе относительно уровня воды в болотном микроландшафте производился долив воды до отметки, соответствующей уровню воды в микроландшафте. При превышении уровня воды в испарителе относительно его положения в микроландшафте слив воды из испарителя не производился.

Было установлено, что в конце вегетационного сезона общая минерализация болотных вод составила  $85 \text{ мг/дм}^3$ . В пробах воды, отобранных по окончании вегетационного сезона, общая минерализация в первом испарителе составила  $159,4 \text{ мг/дм}^3$  при слое испарившейся за сезон воды  $388,4 \text{ мм}$ ; во втором — соответственно  $188,0 \text{ мг/дм}^3$  и  $418,6 \text{ мм}$ . Отсюда следует, что в среднем за конкретный вегетационный сезон  $1 \text{ мм}$  испарившейся влаги увеличивал среднюю минерализацию на  $0,22 \text{ мг/дм}^3$ .

В летний период выше уровня болотных вод отмечается зона распада органического вещества. В этой зоне по мере распада органики зольные компоненты накапливаются в поровом пространстве деятельного слоя и вымываются при подъеме уровня дождевыми водами на олиготрофных болотах, дождевыми и грунтовыми — на болотах других типов. При этом определенная часть минеральных компонентов на протяжении летнего и осеннего периодов растворяется и увеличивает общую минерализацию. В конце осеннего периода на олиготрофных болотах минерализация достигает  $35\text{—}50 \text{ мг/дм}^3$ ; на мезо-олиготрофном Пулозерском болоте — до  $140 \text{ мг/дм}^3$ . При дождевых осадках осенью может наблюдаться некоторое уменьшение концентрации ионов путем разбавления болотных вод маломинерализованными дождевыми водами.

С целью оценки пространственной изменчивости компонентов химического состава болотных вод на болоте Ламмин-Суо были произведены отборы проб воды в 16 пунктах, расположенных в основных болотных микроландшафтах, во всех фазах гидрологического режима. Результаты определения пространственной и временной изменчивости общей минерализации приведены в табл. 4. Ее анализ показывает, что наибольшая пространственная изменчивость общей минерализации  $M_{\text{пр}}$  наблюдается в период, предшествующий началу снеготаяния (22 марта), при наибольшей глубине промерзания, равной  $23 \text{ см}$ . Среднеквадратическое отклонение  $\delta(M_{\text{пр}})$  достигает  $6,13 \text{ мг/дм}^3$ , коэффициент вариации  $C_v$  равен  $0,48$ .

Таблица 4

**Временная и пространственная изменчивость общей минерализации на олиготрофном болоте Ламмин-Суо по наблюдениям в 1968 г.**

Дата	Параметр					Осадки, мм
	Среднее, мг/дм <sup>3</sup>	max, мг/дм <sup>3</sup>	min, мг/дм <sup>3</sup>	$\delta$ , мг/дм <sup>3</sup>	$C_v$	
22 марта	12,7	31,9	7,6	6,13	0,48	159,0*
3 апреля	16,8	26,9	10,9	4,00	0,24	26,6
20 мая	9,3	12,9	7,5	1,38	0,15	113,2
5 июня	8,2	11,1	6,9	3,45	0,13	11,5
20 июня	11,1	15,3	7,7	2,18	0,20	18,4
23 июля	14,3	17,6	9,3	1,51	0,11	60,1
13 августа	11,1	14,2	7,1	2,42	0,22	153,7
30 сентября	8,2	9,4	7,0	0,66	0,08	166,8
13 ноября	8,9	11,9	6,5	1,88	0,15	164,9
По болоту	11,2	31,9	6,5	2,62	0,195	

*Примечание.* max и min — наибольшее и наименьшее значения;  $\delta$  — среднеквадратическое отклонение;  $C_v$  — коэффициент вариации; 159\* — запас воды в снеге 22 марта при средней глубине промерзания болота, равной  $24 \text{ см}$ .

При снеготаянии слой слабоминерализованных снеговых вод (159 мм) по всей площади болота выравнивает общую минерализацию: уменьшаются ее наибольшие значения, увеличиваются наименьшие и среднее значение по болоту до  $16,8 \text{ мг/дм}^3$ , уменьшается  $\delta$  до  $4,00 \text{ мг/дм}^3$  и  $C_v$  — до 0,24. Значительное количество осадков в мае (113,2 мм) уменьшает как среднее значение общей минерализации по болоту (в мае — начале июня до  $8,2\text{—}9,3 \text{ мг/дм}^3$ ), так и  $\delta$  (до  $1,38 \text{ мг/дм}^3$ ), и соответственно  $C_v$  до 0,13—0,15.

На олиготрофном Самотлорском болоте коэффициент вариации общей минерализации в паводочный период достигает наименьших значений (не более 0,07—0,08).

Наступление межени и относительно небольшие осадки в летнюю межень на болоте Ламмин-Суо (вторая декада июня — вторая декада июля) и значительное испарение с его поверхности уменьшают  $\delta$  до  $1,51 \text{ мг/дм}^3$  и  $C_v$  до 0,11. Обильные осадки в сентябре (166,8 мм) понижают  $\delta$  до  $0,66 \text{ мг/дм}^3$  и  $C_v$  до 0,08. В этот период обильных осадков наблюдается наименьшая пространственная изменчивость общей минерализации.

Таким образом, атмосферные осадки уменьшают пространственную изменчивость общей минерализации вод всех типов болот.

Значительное влияние на динамику общей минерализации в период годового цикла оказывает изменение содержания гидрокарбонатного иона. Воды атмосферных осадков, выпадая на болото и взаимодействуя с болотными водами, могут терять гидрокарбонатный ион. В кислых водах олиготрофных болот он полностью отсутствует. По мере увеличения щелочности среды (водородный показатель возрастает) слабокислая среда изменяет свои свойства на слабощелочную. Гидрокарбонатный ион в водах болот появляется в том случае, когда водородный показатель pH становится больше 5,0—5,05. Эти изменения наиболее характерны для вод мезоолиготрофных болот, где зависимость содержания гидрокарбонатного иона  $I_{\text{HCO}}$  ( $\text{мг/дм}^3$ ) от величины pH имеет следующий вид [2]:

$$I_{\text{HCO}} = 0,58(\text{pH})^3 - 6,21(\text{pH})^2 + 20,4(\text{pH}) - 17,9$$

при  $R = 0,83$ .

Большое содержание этого иона в водах мезотрофных и евтрофных болот значительно влияет на их общую минерализацию, зависимость  $M$  ( $\text{мг/дм}^3$ ) для мезоолиготрофных болот Кольского п-ова определяется выражением

$$M = 1,64I_{\text{HCO}} + 32,6$$

при  $R = 0,56$ .

Главной особенностью вод евтрофных болот, в частности Тарманского болотного массива, является их резко выраженный гидрокарбонатно-кальциевый характер. Гидрокарбонатный ион преобладает, его содержание в водах Тарманского болота составляет 65% суммы ионов. Соотношение ионов в болотных водах стремится к пределу, определяемому отношением общей минерализации к содержанию  $\text{HCO}_3^-$  для чистого раствора  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ . Гидрокарбонатный коэффициент для чистого раствора равен 1,33 [1], и он незначительно отличается от аналогичных коэффициентов в уравнениях этой связи для вод осоково-гипнового и грядово-мочажинного комплексов этого массива. Их уравнение связи можно представить соответственно в виде

$$M_{\text{ог}} = 1,34 I_{\text{HCO}} + 75;$$

$$M_{\text{гм}} = 1,36 I_{\text{HCO}} + 35.$$

Коэффициенты корреляции этих зависимостей не меньше 0,993.

Для евтрофного Листвянского болота зависимость описывается уравнением вида

$$M_{\text{ор}} = 1,388 I_{\text{исо}} + 7,12$$

при  $R = 0,993$ .

На олиготрофных болотах гидрокарбонатный ион наблюдается при значительных атмосферных осадках или при интенсивном снеготаянии и только на окраинах болотных массивов. Этому также способствует поверхностный или грунтовый сток со стороны окружающих суходолов.

На северных болотных массивах значительно увеличивается содержание ионов хлора. Так, сравнение содержания ионов хлора в атмосферных осадках и в водах болот Кольского п-ова показывает, что в последних его в два раза больше, но несколько меньше, чем в грунтовых водах. Это свидетельствует о том, что источником хлора могут быть осадки, особенно при их переносе воздушной массой со стороны северных морей или при подпитке болота грунтовыми водами. Ион хлора ( $I_{\text{Cl}}$ ) существенно влияет на общую минерализацию болотных вод. Зависимость определяется выражением

$$M = 1,93 I_{\text{Cl}} + 11,5$$

при  $R = 0,87$ .

Содержание органического вещества в болотных водах оценивалось по значениям бихроматной окисляемости. Использование сернокислого раствора бихромата калия позволяет практически полностью окислить органику.

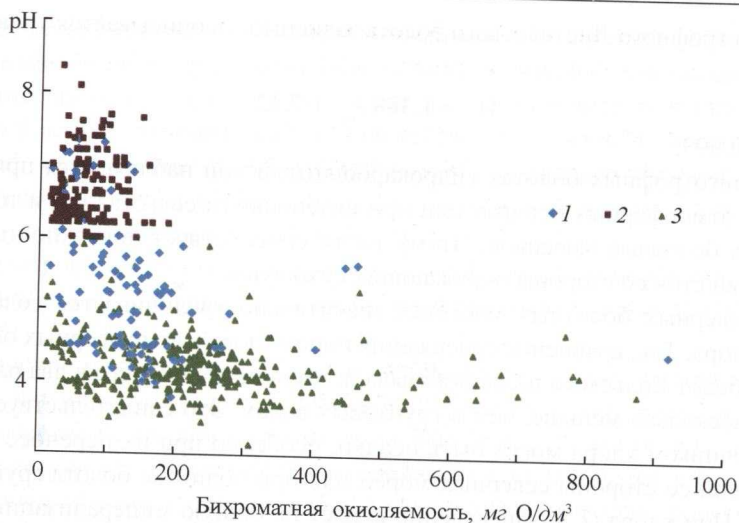
Изменение содержания органики в водах болот происходит практически синхронно с изменением их ионного состава. Оно характеризуется минимальным содержанием весной и в летнюю межень, наибольшим — в холодный период года вне зависимости от типа болотного массива. Весеннее уменьшение концентрации органического вещества обусловлено разбавлением высокогумифицированных болотных вод талыми водами.

Наибольшее содержание органического вещества наблюдается в водах олиготрофных болот (табл. 5). Среднее его значение практически в 3—5 раз больше, чем в водах евтрофных болот. Наибольшее его значение в олиготрофных болотах достигает более  $1000 \text{ мг О/дм}^3$  в диапазоне рН от 3,5 до 5,05. В мезоолиготрофных и евтрофных болотах при рН от 5,05 до 8,20 бихроматная окисляемость практически не превосходит  $200 \text{ мг О/дм}^3$  и несколько уменьшается с увеличением водородного показателя. Наименьшее содержание органического вещества наблюдается в водах евтрофных болот с осоково-тростниковыми и

Таблица 5

Характеристики бихроматной окисляемости вод основных типов болот

Характеристика	Параметр	Тип болотного массива			
		Евтрофные		Мезоолиготрофное	Олиготрофное
		Листвянское	Тарманское	Пулозерское	Иласское
Бихроматная окисляемость, $\text{мг О/дм}^3$	Среднее	45,4	84,1	135,3	232,4
	max	186,7	188,8	919,0	872,9
	min	14,5	21,4	17,3	13,3
Водородный показатель рН	Среднее	6,36	6,9	5,30	4,28
	max	7,2	8,6	7,34	6,95
	min	6,0	6,0	3,80	3,15



Зависимость степени кислотности болотных вод мезоолиготрофных (1), евтрофных (2) и олиготрофных (3) болот от их бихроматной окисляемости.

вейниковыми ассоциациями (Листвянское болото). В кислой среде олиготрофных болот содержание органического вещества существенно больше, чем в слабощелочной среде других типов болот.

Зависимость между содержанием органического вещества в водах основных типов болот, показателем которого является бихроматная окисляемость, и степенью их кислотности, приведена на рисунке. Приблизительно она описывается уравнением вида

$$\text{pH} = 8,296 Q_{\text{бих}}^{-0,119},$$

где  $Q_{\text{бих}}$  — бихроматная окисляемость, мг O/дм³.

Коэффициент корреляции этой зависимости равен 0,444, что подтверждает относительно слабую зависимость степени кислотности среды от содержания органического вещества в водах всех типов болот.

### Выводы

Установлено, что во всех типах болот России (олиготрофных, евтрофных и мезоолиготрофных) гидрохимический режим имеет общие характерные черты. В позднеосенний и зимний периоды при промерзании деятельного слоя болот происходит увеличение общей минерализации болотных вод, обусловленное вытеснением ионов из солевого раствора растущими кристаллами льда.

На олиготрофных болотах в предпагодочный период общая минерализация увеличивается в 2,5 раза по сравнению с ее значениями в период, предшествующий промерзанию. Удельный прирост минерализации составляет 0,6—0,8 мг/дм³ на 1 см промерзшего слоя. На мезоолиготрофных болотах она увеличивается в 7,1 раза при приросте 2,33 мг/дм³ на 1 см промерзания. На евтрофных болотах минерализация возрастает в 1,3—1,8 раза при приросте 14,9—25,0 мг/дм³ на 1 см промерзшего слоя. Наибольшей за зимний период глубине промерзания соответствует и наибольшее значение общей минерализации.

Весной слабоминерализованные талые снеговые воды путем разбавления уменьшают общую минерализацию: на евтрофном Тарманском болоте — в

1,5 раза, на Ливинском — в 7,4 раза. На олиготрофных и мезоолиготрофных болотах общая минерализация уменьшается до уровня минерализации талых вод и атмосферных осадков.

В вегетационный период формирование общей минерализации происходит под влиянием процессов поглощения минеральных компонентов произрастающей растительностью и увеличения их содержания при распаде органики и в процессе испарения. На евтрофном болоте 1 мм испарившейся влаги увеличивает общую минерализацию на  $0,22 \text{ мг/дм}^3$ .

На олиготрофных болотах наибольшая пространственная изменчивость общей минерализации (коэффициент вариации 0,48) наблюдается при наибольшей глубине промерзания. Снеготаяние и весенние осадки уменьшают пространственную изменчивость до значений коэффициентов вариации 0,13—0,24. Обильные осенние осадки уменьшают коэффициент вариации минерализации до 0,07—0,08. Выпадение атмосферных осадков уменьшает пространственную изменчивость общей минерализации на всех типах болот.

Установлено, что гидрокарбонатный ион в водах всех типов болот наблюдается в том случае, когда водородный показатель становится более 5,0—5,05. При pH более 6,9—7,0 его содержание на евтрофных болотах может превышать  $1000 \text{ мг/дм}^3$ .

Наибольшее содержание органического вещества наблюдается в водах олиготрофных болот, где его бихроматная окисляемость достигает  $1000 \text{ мг O/дм}^3$ . В водах евтрофных и мезоолиготрофных болот эта величина не превосходит  $200 \text{ мг O/дм}^3$ .

Изменение содержания органического вещества в водах всех типов болот происходит синхронно с изменением их ионного состава.

## Литература

- Воронков П. П.** Формирование химического состава поверхностных вод степной и лесостепной зон Европейской территории СССР. — Л., Гидрометеиздат, 1955, 352 с.
- Калюжный И. Л.** Гидрохимический режим и химический состав мезоолиготрофных болотных массивов Кольского полуострова. — Вестник КНЦ РАН, 2016, № 3, с. 114—125.
- Калюжный И. Л.** Общие черты формирования гидрохимического режима и химического состава вод евтрофных болотных массивов. — Водное хозяйство России, 2016, № 3, с. 30—46.
- Калюжный И. Л., Лавров С. А., Решетников А. И., Парамонова Н. Н., Привалов В. И.** Эмиссия метана на олиготрофном болотном массиве северо-запада России. — Метеорология и гидрология, 2009, № 1, с. 53—67.
- Калюжный И. Л., Левандовская Л. Я.** Гидрохимический режим поверхностных вод Гарманского болотного массива. — Труды ГТИ, 1977, вып. 236, с. 85—95.
- Калюжный И. Л., Левандовская Л. Я.** Особенности формирования гидрохимического режима, химического состава и качества вод верховых болотных массивов некоторых болотных провинций СССР. /В сб.: Труды VI Всесоюзного гидрологического съезда. — Л., Гидрометеиздат, 1976, т. 9, с. 292—304.
- Наставление** гидрологическим станциям и постам. Вып. 8. Гидрометеорологические наблюдения на болотах. — Л., Гидрометеиздат, 1972, 296 с.

## Влияние изменений климата на водный режим и максимальный сток на примере водосбора р. Карун, Иран

З. Рамак\*, Д. Порхематг\*\*, Х. Седгхи\*\*\*, И. Фаттахы\*\*\*\*, М. Лашни-Занд\*\*\*\*\*

*Одним из наиболее важных последствий изменения климата является изменение водного режима и повторяемости наводнений. Водосбор р. Карун — один из важнейших водосборов на территории Ирана, который, однако, до сих пор детально не исследован. В связи с этим в настоящей работе рассмотрено влияние климатических изменений на годовой и максимальный сток водосбора р. Карун в районе моста Шалу. В процессе исследования данные о температуре и месячных суммах осадков из модели HadCM3 подвергались процедуре даунскейлинга на основании трех сценариев A1B, A2 и B1 с использованием модели LARS-WG. Затем данные повторно подвергались пространственному даунскейлингу с помощью коэффициентов изменений, а для моделирования стока использовалась модель SRM. Полученные результаты показали, что климатические изменения влияют на водный режим исследуемого водосбора.*

**Ключевые слова:** изменение климата, водный режим, максимальный сток, повторяемость, даунскейлинг.

### 1. Введение

В последние десятилетия глобальное потепление привело к крупномасштабным изменениям гидрологического цикла, таким как увеличение содержания водяного пара в атмосфере, изменение интенсивности, границ и структуры полей осадков, влияние на морские побережья, сокращение снежного покрова, крупномасштабное таяние льдов, изменение содержания почвенной влаги и речного стока [6]. Проведены различные исследования, основанные на тесной связи между глобальным потеплением и гидрологическими процессами и посвященные изучению влияния изменений климата на расход воды в реках и водные ресурсы во всем мире (см., например, [1, 3, 5, 9—11] и др.).

Водосбор р. Карун является одним из важнейших районов Ирана с точки зрения расхода воды. Этот бассейн имеет особое расположение, и на его пути

\* Департамент гидротехнического строительства, Исламский университет Азад, Отделение научных исследований, Тегеран, Иран.

\*\* Научно-исследовательский институт охраны почв и управления водосборами, Тегеран, Иран.

\*\*\* Департамент наук о воде и гидротехнического строительства, Исламский университет Азад, Отделение научных исследований, Тегеран, Иран.

\*\*\*\* Климатологический научно-исследовательский институт, Национальный климатологический центр, Тегеран, Иран.

\*\*\*\*\* Сельскохозяйственная научно-исследовательская и образовательная организация, Хорремабад, Иран.

построены разные гидротехнические сооружения. Учитывая наблюдающиеся климатические изменения, важность этого водосбора и небольшое число исследований по этой проблеме, в данной работе проведен анализ влияния изменений климата на сток и повторяемость наводнений в рассматриваемом водосборе. Целью настоящей работы является оценка качества климатической модели HadCM3 в районе исследования, даунскейлинг климатических параметров, построение климатических сценариев и прогноз температуры воздуха и количества осадков на будущий период, а также анализ изменений водного режима в период 2011—2030 гг. при трех сценариях изменения климата A1B, A2 и B1 по сравнению с базовым периодом (1970—2000 гг.).

## 2. Данные и методы исследования

**Район исследования.** Водосбор р. Карун расположен на юго-западе Ирана и является одним из важнейших водосборов с точки зрения расхода воды. Его географическое положение ограничено координатами  $30^{\circ}27'—33^{\circ}41'$  с. ш. и  $30^{\circ}48'—50^{\circ}51'$  в. д. (рис. 1). Эта река берет начало с одной из самых высоких вершин горной системы Загрос и течет по направлению к Персидскому заливу. Река Карун состоит из трех главных протоков: Карун Олия, Базуфт и Херсан, площадь водосбора которых в районе моста Шалу около 24 тыс. км<sup>2</sup>. Ее основное питание определяется снеготаянием.

**Данные.** Используются данные о максимальной и минимальной температуре, количестве осадков, продолжительности солнечного сияния, снежном покрове и расходе воды, полученные на нескольких станциях:

Станция	Шехре-Корд	Ясудж	Дизфуль	Ахваз	Мост Шалу
Широта с.	$32^{\circ}17'$	$30^{\circ}41'$	$32^{\circ}24'$	$32^{\circ}20'$	$31^{\circ}45'$
Долгота в.	$50^{\circ}51'$	$51^{\circ}33'$	$48^{\circ}23'$	$48^{\circ}40'$	$50^{\circ}08'$
Высота, м	2048,9	1816,6	143,0	22,5	700,0

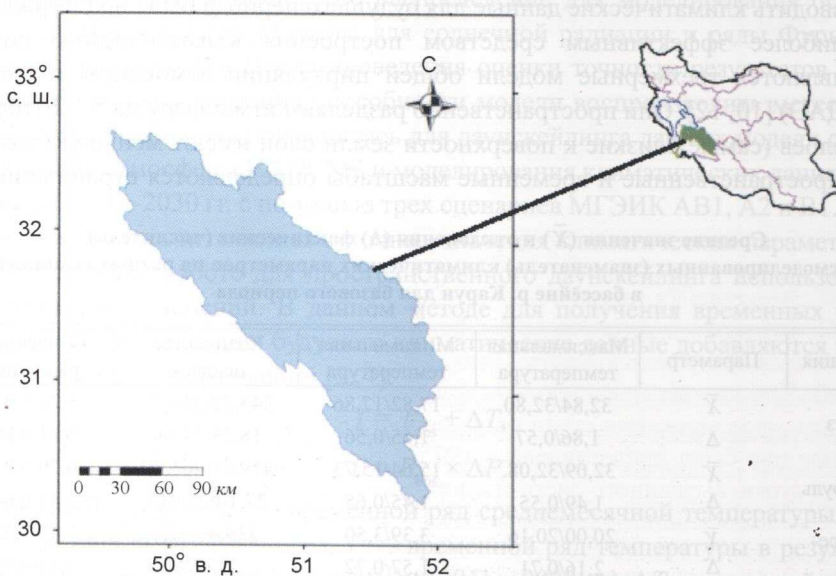


Рис. 1. Географическое расположение и топография водосбора р. Карун на карте Ирана.

Для исследования с помощью модели талого стока SRM станция Шехре-Корд была выбрана как основная синоптическая, а станция Мост Шалу — как основная гидрометрическая. Необходимо отметить, что данные за период 2001—2002 гг. использовались для калибровки модели SRM, а для оценки ее качества использовались данные за период 1998—1999 гг.

**Прогноз климатических параметров.** Для оценки возможности прогноза климатических параметров с помощью модели LARS-WG была оценена ее способность воспроизвести данные наблюдений на четырех метеорологических станциях: Ахваз, Дизфуль, Шехре-Корд и Ясудж. После подтверждения этой возможности была проведена оценка изменений средних значений минимальной и максимальной температуры воздуха и количества осадков на вышеупомянутых станциях за период 2011—2030 гг. по сравнению с базовым периодом (1970—2000 гг.) для трех сценариев: A1B, A2 и B1.

В настоящей работе рассчитывались средняя систематическая ошибка (bias) и средняя абсолютная ошибка (MAE) результатов моделирования относительно данных наблюдений за выбранный период:

$$\text{bias} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i), \quad (1)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |S_i - O_i|, \quad (2)$$

где  $O_i$  и  $S_i$  — среднемесячное значение параметра по данным наблюдений и моделирования соответственно ( $i$  — месяц). Результаты сравнения данных модельных расчетов и наблюдений для базового периода (1970—2000 гг.) для четырех станций представлены в таблице. Значение коэффициента детерминации для всех параметров составило 0,94—0,97. Такие показатели качества, как средняя абсолютная ошибка, отклонение и квадратическая ошибка, оказались небольшими. Поскольку не было получено очевидного различия между данными моделирования и наблюдений для периода 1970—2000 гг., способность модели воспроизводить климатические данные для будущего периода была подтверждена.

Наиболее эффективным средством построения климатического сценария являются трехмерные модели общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) [10, 12]. Они пространственно разделяют атмосферу на 5—20 неравных слоев (самые близкие к поверхности земли слои имеют меньшую толщину). Пространственные и временные масштабы определяются ограничениями

Средние значения ( $\bar{X}$ ) и отклонения ( $\Delta$ ) фактических (числитель) и смоделированных (знаменатель) климатических параметров на разных станциях в бассейне р. Карун для базового периода

Станция	Параметр	Максимальная температура	Минимальная температура	Количество осадков	Солнечная радиация
Ахваз	$\bar{X}$	32,84/32,80	17,82/17,86	243,22/266,27	6,26/6,33
	$\Delta$	1,86/0,57	1,65/0,56	18,28/17,69	3,84/0,88
Дизфуль	$\bar{X}$	32,09/32,08	15,64/15,73	419,89/465,89	6,79/6,87
	$\Delta$	1,49/0,55	1,45/0,65	27,10/25,915	2,41/0,64
Шехре-Корд	$\bar{X}$	20,00/20,16	3,39/3,50	339,49/327	7,42/7,52
	$\Delta$	2,16/0,71	1,57/0,72	21,8/20	3,11/0,72
Ясудж	$\bar{X}$	22,34/22,29	8,00/7,90	864/850	8,77/8,79
	$\Delta$	1,52/0,6	1,03/0,48	54,19/41,67	0,80/0,60

уравнения динамики жидкости в этих моделях. В настоящем исследовании используются выходные данные модели HadCM3, разработанной в Центре Хедли по климатическим прогнозам и исследованиям.

В данной работе для оценки изменений температуры воздуха и количества осадков использованы три климатических сценария: A1B, A2 и B1. Для устранения возмущений при моделировании климатических колебаний, которые вызваны большим размером вычислительных ячеек МОЦАО, вместо непосредственно модельных данных для расчета климатических изменений использовались осредненные за 30-летний период значения [7, 8]:

$$\Delta T = \bar{T}_{\text{GCM, fut}} - \bar{T}_{\text{GCM, base}}, \quad (3)$$

$$\Delta P = \frac{\bar{P}_{\text{GCM, fut}}}{\bar{P}_{\text{GCM, base}}}. \quad (4)$$

В уравнении (3)  $\bar{T}_{\text{GCM, fut}}$  — среднее значение температуры за 30 лет по данным МОЦАО для будущего периода (например, 2010—2039 гг.), а  $\bar{T}_{\text{base}}$  — среднее значение температуры за 30 лет по данным МОЦАО за период 1971—2000 или 1961—1990 гг. В уравнении (4) для осадков все обозначения аналогичны используемым в уравнении (3).

**Пространственный даунскейлинг.** В данном исследовании пространственный даунскейлинг осуществляется с помощью статистической модели LARS-WG, которая представляет собой стохастический генератор погоды и может использоваться для моделирования условий погоды в одном и том же районе для текущего и будущего климата. Статистические свойства данных те же самые, но отклонение будет дифрагировано по сравнению с различием между МОЦАО для текущего и будущего периодов. Данные временных рядов суточных значений метеорологических величин, например, максимальной и минимальной температуры, солнечной радиации, количества осадков представлены для одних и тех же климатических переменных. В модели LARS-WG используются полуэмпирическое распределение для моделирования осадков и их вероятности, цепь Маркова для солнечной радиации и ряды Фурье для температуры [13—15]. После проведения оценки точности результатов моделирования и подтверждения способности модели воспроизводить метеорологические величины она применялась для даунскейлинга данных модели общей циркуляции атмосферы HadCM3 и моделирования климатических данных для периода 2011—2030 гг. с помощью трех сценариев МГЭИК A1B, A2 и B1. В конечном итоге рассчитывались суточные значения климатических параметров.

В настоящей работе для пространственного даунскейлинга использовался коэффициент изменений. В данном методе для получения временных рядов климатического сценария будущего климатические данные добавляются в сценарии с данными наблюдений [2, 4]:

$$T = T_{\text{obs}} + \Delta T, \quad (5)$$

$$P = P_{\text{obs}} \times \Delta P. \quad (6)$$

В уравнении (5)  $T_{\text{obs}}$  — временной ряд среднемесячной температуры в базовый период (1970—2000 гг.);  $T$  — временной ряд температуры в результате изменения климата в будущем периоде (2011—2030 гг.);  $\Delta T$  — сценарий климатических изменений после применения процедуры даунскейлинга. Параметры в уравнении (6) для количества осадков аналогичны.

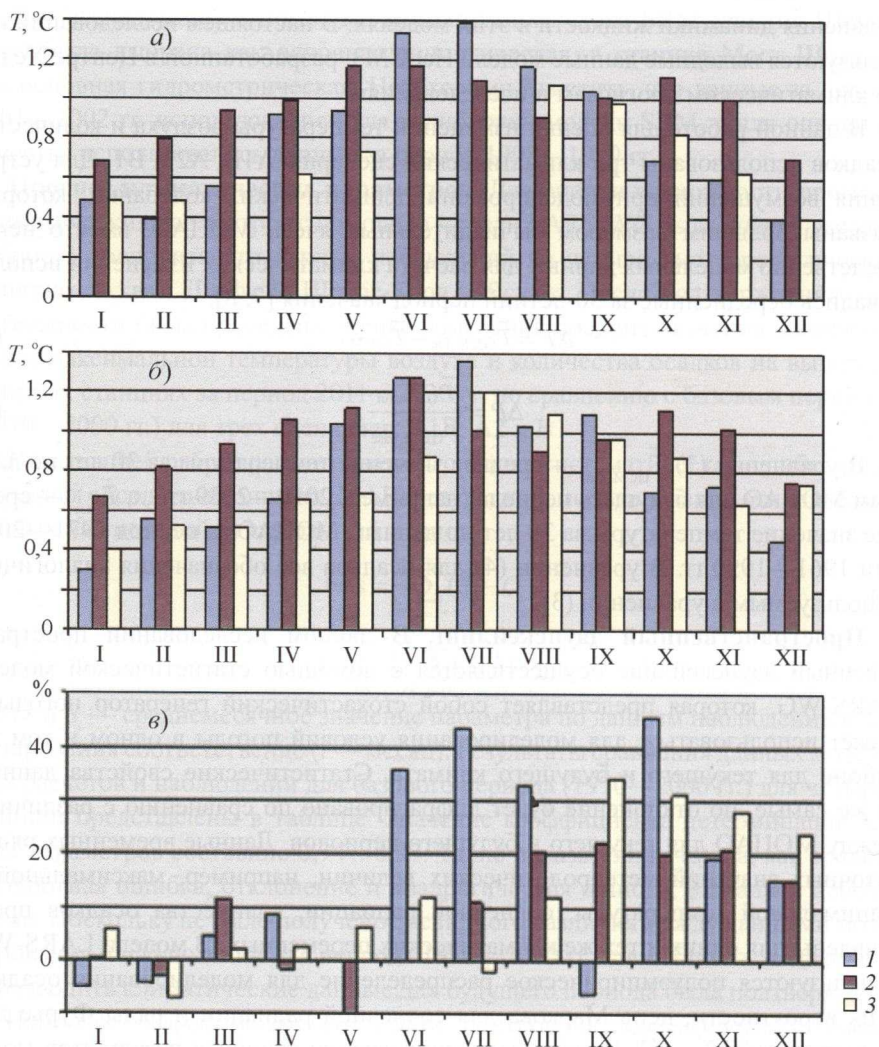


Рис. 2. Результаты моделирования изменения минимальной (а) и максимальной (б) температуры воздуха, а также количества осадков (в процентах по сравнению с базовым периодом; в) на основе различных сценариев изменения климата.

1 — сценарий А1В; 2 — А2; 3 — В1.

На рис. 2 представлены результаты моделирования изменений минимальной температуры, максимальной температуры и количества осадков на основе сценариев изменения климата.

В большинстве высокогорных районов водосбора р. Карун, не только в северной части в протоках Карун Олия и Базуфт, но и в южной части в районе протоки Херсан выпадает большое количество осадков в виде снега. В связи с этим для моделирования стока была использована модель талого стока SRM. Впервые она была представлена в 1975 г. для моделирования и прогноза суточного стока, вызванного снеготаянием в небольших горных районах Европы. Это физическая концептуальная модель, основанная на методе градусо-дней. В данной модели значения талого и дождевого стока рассчитываются ежедневно, затем добавляются к грунтовому стоку и в конечном итоге пересчитываются в расход воды с помощью переходного коэффициента. Основная структура модели выглядит следующим образом:

$$Q_{n+1} = \{ [C_{SAn} a_{An} (T_n + \Delta T_{An}) S_{An} + C_{RAn} P_{An}] A_A + [C_{SBn} a_{Bn} (T_n + \Delta T_{Bn}) S_{Bn} + C_{RBn} P_{Bn}] A_B + [C_{SCn} a_{Cn} (T_n + \Delta T_{Cn}) S_{Cn} + C_{RCn} P_{Cn}] A_C \} \times \frac{10\,000}{86\,400} (1 - K_{n+1}) + Q_n K_{n+1} \quad (7)$$

где  $Q$  — среднесуточный расход воды ( $m^3/c$ );  $C_s$  — коэффициент талого стока;  $C_r$  — коэффициент дождевого стока;  $a$  — коэффициент стаивания ( $см/(°C \cdot сут)$ );  $T$  — число градусо-дней ( $°C \cdot сут$ ),  $\Delta T$  — разность между температурой на средней гипсометрической высоте и температурой на основной станции;  $S$  — отношение площади, покрытой снегом, к площади района;  $P$  — осадки, участвующие в производстве стока ( $см$ );  $A$  — площадь района ( $км^2$ );  $N$ ,  $N + 1$  — последовательность дней в период расчета расхода воды;  $K$  — коэффициент спада, отражающий уменьшение расхода в период без снеготаяния или осадков:  $K = Q_{m+1}/Q_m$  ( $m$ ,  $m + 1$  — последовательность дней в период реального спада стока);  $\frac{10\,000}{86\,400}$  — переводной коэффициент.

Температура, среднее количество осадков, доля площади района, покрытой снегом, измеряются каждый день. Такие параметры, как  $C_s$ ,  $C_r$  и  $K$ , зависят от свойств района,  $T$  и  $\Delta T$  связаны с климатическими характеристиками района. Уравнение (7) записано для района, разделенного на три части по высоте с учетом времени запаздывания, равного 18 ч. Индексы  $A$ ,  $B$ ,  $C$  при параметре  $A$  и других параметрах показывают высоту. Следует отметить, что анализ исторических данных о расходе воды обычно является хорошим способом определения  $k$ . Значения  $Q_n$  и  $Q_{n+1}$  строятся относительно друг друга, и нижняя огибающая линия для всех точек считается отображающей значение  $k$ . Это означает, что значение  $k$  не постоянно, а увеличивается с уменьшением  $Q$  согласно следующему уравнению:

$$K_{n+1} = xQ_n^{-y}, \quad (8)$$

где константы  $x$  и  $y$  должны определяться для заданного бассейна путем решения следующих уравнений:

$$k_1 = xQ_1^{-y},$$

$$k_2 = xQ_2^{-y},$$

$$\lg k_1 = \lg x - y \lg Q_1, \quad (9)$$

$$\lg k_2 = \lg x - y \lg Q_2. \quad (10)$$

Одним из преимуществ модели SRM является ее способность одновременно демонстрировать смоделированный и фактический гидрографы стока, таким образом по графикам можно контролировать качество моделирования (рис. 3). В дополнение к этой модели могут использоваться два других критерия: коэффициент детерминации и разность объемов  $D_r$ . Эти критерии рассчитываются автоматически. В настоящей работе для калибровки и валидации модели SRM использовались периоды 2001—2002 и 1998—1999 гг., характеризующиеся более полными данными о снежном покрове. Коэффициент детерминаций составил около 0,8 для периода калибровки и 0,77 для периода валидации, а разность объемов между смоделированным и фактическим расходом — 0,70 и 0,77 соответственно.

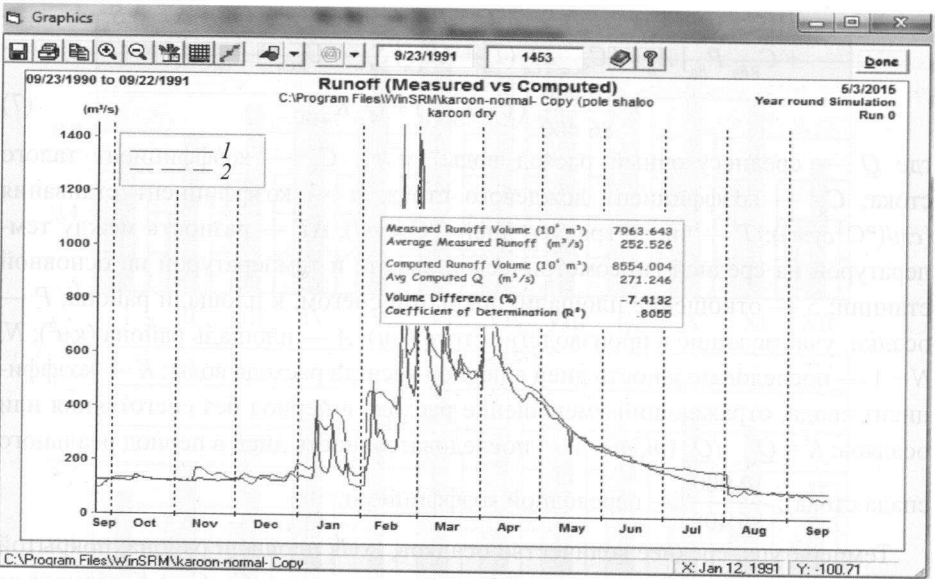


Рис. 3. Калибровка модели SRM для периода 2001—2002 гг.

1 — измеренный сток; 2 — рассчитанный сток. На врезке посередине указаны: измеренный объем стока ( $10^6 \text{ м}^3$ ), средний измеренный сток ( $\text{м}^3/\text{с}$ ), рассчитанный объем стока ( $10^6 \text{ м}^3$ ), средний рассчитанный сток ( $\text{м}^3/\text{с}$ ), разность объемов (%), коэффициент детерминации ( $R^2$ ).

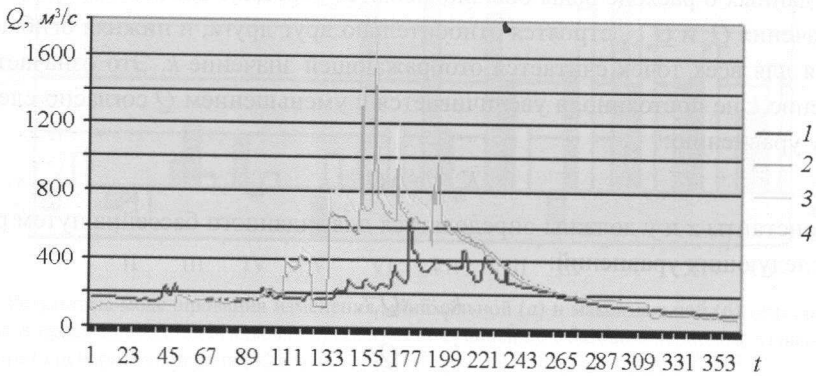


Рис. 4. Прогноз стока в районе моста Шалу с использованием трех сценариев A1B (2), A2 (3) и B1 (4) по сравнению со стоком в базовый период (1).

После калибровки и валидации модели SRM и построения сценариев будущих климатических изменений она была использована для прогноза стока в период 2011—2030 гг. (рис. 4).

### 3. Результаты исследования

Как видно на рис. 2, минимальная и максимальная температура на водосборе на основной станции в период 2011—2030 гг. будет увеличиваться для всех трех сценариев, в то время как изменения количества осадков (в процентах по сравнению с базовым периодом) в этот же период составят от  $-4$  до  $44\%$  для сценария A1B, от  $-10$  до  $22\%$  для сценария A2 и от  $-8$  до  $34\%$  для сценария

**B1.** После расчета сценариев изменения климата с помощью уравнений (1) и (2) рассчитаны месячные временные ряды минимальной и максимальной температуры и количества осадков. Важно отметить, что в этих уравнениях среднемесячные временные ряды используются для фактических параметров. Как отмечалось выше, исследователи используют модель SRM для моделирования талого стока. После калибровки и валидации модели и настройки параметров снеготаяния для региона исследования был дан прогноз стока на период 2011—2030 гг. на основе трех рассматриваемых сценариев A1B, A2 и B1, а также прогноз стока на будущий период с учетом климатических изменений с помощью модели HadCM3. Так, прогнозируемые средние значения стока для разных месяцев в период 2011—2030 гг. в бассейне р. Карун в районе моста Шалу для трех сценариев A1B, A2 и B1 составят (%):

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
A1B	37,4	162	9,6	41	8	3	17,6	-23	-28	-23	-25	-12
A2	55	202	26	47	11	4,5	17,7	-24	-29	-22	-20	-3
B1	45	160	9,2	37	5,5	0,38	15	-23,4	-29,1	-22,5	-25,2	-10

#### 4. Выводы

Результаты настоящего исследования показывают, что режим р. Карун подвержен влиянию климатических изменений, и сток на водосборе при сценариях A1B, A2 и B1 увеличится соответственно на 14, 22 и 13,5% в период 2011—2030 гг. Эти данные могут быть полезны для планирования и управления водными ресурсами данного бассейна. Менеджерам, ответственным за управление водными ресурсами, рекомендовано принимать необходимые меры и использовать подходящие управленческие стратегии в случаях высоких расходов воды и максимального стока в период сильных штормов и в случаях малого стока в период низкой вероятности осадков. В будущих исследованиях предполагается использовать сочетание учета неопределенности моделей общей циркуляции атмосферы и океана, методов даунскейлинга, экспоненциальных моделей и моделей дождевого стока.

#### Литература

- Alfieri L., Brurek P., Feyenand L., and Forzieri G.** Global warming increases the frequency of river floods in Europe. — *Hydrol. and Earth System Sci.*, 2015, vol. 19, pp. 2247—2260.
- Barrow E., Hulme M., and Semenov M.** Effect of using different methods in the construction of climate change scenarios: Examples from Europe. — *Climate Res.*, 1996, vol. 7, pp. 195—211.
- Belchikov V. A., Polunin A. Ya., Simonov Yu. A., and Khristoforov A. V.** Polyvariant estimation of possible climatologic river runoff changes with emphasis on the Northern Dvina catchment. — *Russ. Meteorol. and Hydrol.*, 2009, vol. 34, No. 3, pp. 180—186.
- Dewalle D. and Rango A.** Principles of Snow Hydrology, Chapter 3. — 2008, pp. 48—74.
- Donnelly C., Yang W., and Dahne J.** River discharge to the Baltic Sea in a future climate. — *Clim. Change*, 2014, vol. 122, pp. 157—170.
- Ficklin D. L., Luo Y., Luedeling E., and Zhang M.** Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural watershed using SWAT. — *J. Hydrol.*, 2009, vol. 374, No. 1—2, pp. 16—29.
- IPCC-TGCI.** Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. /T. R. Carter, M. Hulme, and M. Lal (eds.). — Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on

- Scenarios for Climate Impact Assessment, Version 1.69, 1999.
8. **Jones P. D. and Hulme M.** Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: Methods and illustrations. — *Int. J. Climatol.*, 1996, vol. 16, pp. 361—377.
9. **Khrstoforov A. V., Kruglova G. V., and Samborski T. V.** Stochastic model of the runoff fluctuations for rivers with a flood flow regime. /In: *Hydrological Models for Environmental Management*. — NATO Science Series, Environmental Security, 1999, vol. 79, pp. 23—39.
10. **Martinez J., Rango A., and Roberts R.** Snowmelt Runoff Model (SRM) User's Manual, version 1.11, 2008.
11. **Mendizabal M., Sepulveda J., and Torp P.** Climate change impacts on flood events and its consequences on human in Deba River. — *Int. J. Environ. Res.*, 2014, vol. 8, No. 1, pp. 221—230.
12. **Murphy J. M., Booth B., Collins M., Harris G., Sexton D., and Webb M.** A methodology for probabilistic predictions of regional climate change from perturbed physics ensembles. — *Philos. T. Roy. Soc. A*, 2007, vol. 365, pp. 1993—2028.
13. **Semenov M. A. and Barrow E. M.** LARS a Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies. User's Manual, Version 3. — 2002.
14. **Semenov M. A. and Brooks R. J.** Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. — *Climate Res.*, 1998, vol. 10, pp. 95—107.
15. **Wilby R. L. and Harris I.** A frame work for assessing uncertainties in climate change impacts: Low flow scenarios for the River Thames, UK. — *Water Resour. Res.*, 2006, vol. 42, W02419, pp. 1—10.

Поступила в редакцию 27 IV 2016 г., после доработки 16 V 2016 г.

### THE CLIMATE CHANGE IMPACT ON WATER REGIME AND MAXIMUM FLOW IN A CATCHMENT. A CASE STUDY OF THE KARUN RIVER CATCHMENT IN THE SHALU BRIDGE SITE

Z. Ramak, J. Porhemmat, H. Sedghi, E. Fattahi, and M. Lashni-Zand

*One of the most important effects of climate change is the effect on the river regime and the frequency of flood occurrence. The Karun catchment is one of the most important Iran catchments but it has never been studied too specifically. The authors of the present study try to consider the effect of this phenomenon on the annual flow and the maximum flow in the Karun catchment in the exact place of the Shalu bridge site. At first temperature and monthly precipitation of HadCM3 model has been downscaled based on 3 scenarios (A1B, A2, and B1) by the use of LARS-WG model, then data have been spatially downscaled based on the change factor model for the second time and SRM model has been used to simulate the runoff. The results show that the climate change affects the river regime of this catchment.*

УДК 556.166.2+556.121.3(470.5)

## Сравнительный статистический анализ данных наблюдений осадкомеров и плuviографов для оценки характеристик паводкоформирующих осадков на территории Урала

Д. Е. Клименко\*, Е. С. Черепанова\*, Л. В. Габова\*, И. В. Щапова\*

*В практике расчетов паводочного стока в качестве основного параметра выступает сумма осадков за расчетный ливень, определяемая с помощью осадкомера или плuviографа за календарные сутки или за некалендарное время дождя. Приборные погрешности плuviографа исследованы мало, а взаимная увязка статистических параметров сумм осадков по двум приборам ранее не была выполнена. На основании анализа парных временных рядов по 192 метеостанциям авторами выполнена оценка статистических параметров расчетных ливней. Установлено превышение сумм осадков редкой повторяемости за период ливней над суточными суммами, характерное для горных районов Урала, связанное с внутрисуточным режимом выпадения осадков в горах и различиями методики измерений с помощью двух приборов. Впервые выполнено картирование 1%-ных сумм осадков за время расчетных ливней и даны рекомендации по использованию результатов в расчетах паводочного стока.*

**Ключевые слова:** расчетные ливни, осадкомер, плuviограф, увязка данных наблюдений за осадками, Уральское УГМС, дождевые паводки, малые реки.

### 1. Введение

Корректная оценка статистических параметров ливней как самостоятельного события является важнейшей задачей расчетов паводочного стока. Измерение осадков ведется с помощью двух разных приборов: суточные (календарные) максимумы определяются на осадкомерах Третьякова, суммы осадков (некалендарные) за единичные ливни — на плuviографах П-2. Развитие методов математического моделирования стока, гидрологических расчетов, внедрение на сети Росгидромета автоматических датчиков осадков, использование радиолокационной информации в численных моделях погоды показывают актуальность исследования статистических параметров расчетных дождей как самостоятельного события.

В настоящее время пространственная взаимосвязь суточных данных о ливнях с параметрами некалендарного дождя, соотношения их статистических параметров и экстремальных значений, погрешности их определения исследованы мало [2—4]. Хотя материалы наблюдений осадкомеров и плuviографов более 70 лет совместно используют в расчетах паводочного стока (в том числе стока с городских территорий в расчетах систем ливневой канализации [13, 14, 24]), взаимная увязка этих материалов не освещена в исследованиях.

\* Пермский государственный национальный исследовательский университет; e-mail: listopad19531@mail.ru.

По методике измерения осадков на сети Росгидромета количество выпавших осадков на осадкомерах с 1986 г. в IV часовом поясе (Екатеринбург) производится в 8 и 20 ч местного гражданского времени (с 1966 по 1986 г. вели четырехсрочные наблюдения) [10]. Сумма осадков за метеорологические сутки (совпадающие для территории Урала с астрономическими) исчисляется как сумма осадков за указанные два срока; осадки, выпавшие после 20 ч (до 1986 г. — после 2 ч), относятся к следующим суткам. На плювиографах осадки измеряют без привязки к стандартным срокам и метеорологическим суткам. Вследствие этого разногласия части единого ливня, зафиксированные осадкомером до и после 20 ч, будут отнесены к разным расчетным суткам. Теоретически суммы осадков за ливень ( $R$ , мм) могут в 2 раза превышать суточные суммы осадков ( $D$ , мм) (рис. 1). Фактически расхождения определяются преобладающим временем выпадения ливневых осадков и типом ливня по форме профиля

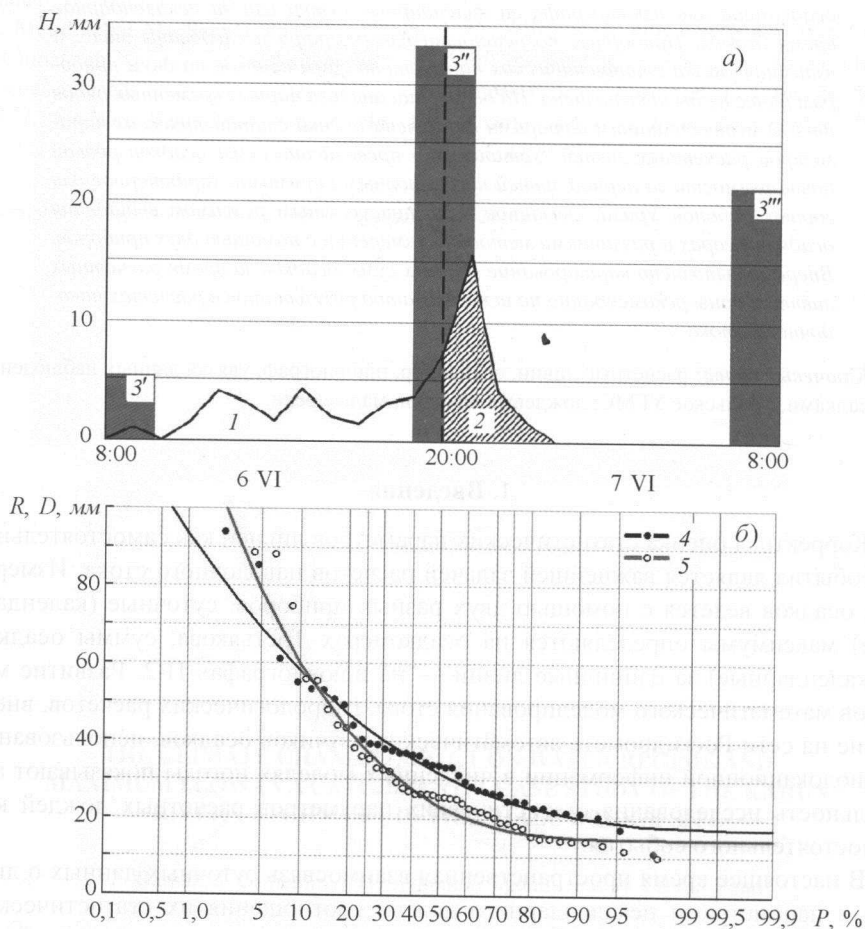


Рис. 1. Пример расхождения данных о суммах осадков за сутки (а) и за ливень (б): а) суточные данные наблюдений на метеостанции Бутка за 6—7 июня 2003 г. (данные часового разрешения): 1 — сумма осадков за ливень, фиксируемая осадкомером с 8 ч 1 мин до 20 ч 6 июня; 2 — сумма осадков за ливень, фиксируемая осадкомером с 20 ч 1 мин 6 июня до 8 ч 7 июня (включает осадки, выпавшие 6 июня, но отнесенные к 7 июня);  $3'$ ,  $3''$ ,  $3'''$  — суммы осадков, зафиксированные осадкомером соответственно в 8 ч, 20 ч 6 июня и в 8 ч 7 июня; б) эмпирические кривые распределения максимальных в году сумм осадков за сутки (4) и за ливень (5) для метеостанции Челябинск (1960—2015 гг.).

дождя. Отмеченное несовершенство методики наблюдений делает практически невыполнимым положение п. 5.6.15.4 РД 52.04.614-2000 [11] о допустимом 10%-ном расхождении суточных сумм осадков по осадкомеру и плювиографу (для опубликованных в изданиях [8, 9] материалов в 59% случаев это положение не выполняется).

В практике гидрологических расчетов отмеченные расхождения могут приводить к занижению расчетных расходов воды дождевых паводков при необоснованном выборе источника (прибора) данных о характеристиках расчетных ливней.

## 2. Изученность вопроса

Несмотря на многолетний опыт совместного использования данных плювиографа и осадкомера, работы, посвященные анализу взаимосвязи их данных, регистрируемых в течение некалендарных 24-часовых периодов, и обоснованию применения слоя осадков 1%-ной обеспеченности за календарные сутки (а не за ливень), практически отсутствуют.

Статистические характеристики и методы анализа данных об экстремальных осадках освещены в многочисленных исследованиях, основополагающими среди которых являются работы З. П. Богомазовой и З. П. Петровой (1940-е годы), Г. А. Алексеева (1950-е годы). Современные российские исследования по данной теме обобщены в работе [5]. Погрешности измерения осадков в разные годы изучали Э. Г. Богданова, И. Г. Горбунова, Ю. В. Макаров, В. Г. Боженко, Н. П. Павлова, Л. Р. Струзер. Для территории Урала погрешности измерения осадков исследованы сотрудниками Уральского УГМС (В. А. Тарамжиной) [18].

В зарубежных публикациях [20, 21, 24, 26] выбор источника данных о ливнях зависит от вида решаемой задачи, вопросы увязки приборно-гетерогенных данных в зарубежных работах не освещаются, хотя в [22, 23, 25] приведены некоторые сведения о приборных погрешностях измерений при их разной частоте (от 1 до 24 раз в сутки). В расчетах ливневой канализации как в России [14], так и за рубежом традиционно используют данные плювиографов [24]. В моделях паводочного стока чаще применяют данные расчетных ливней (в условиях масштабного внедрения за рубежом автоматических датчиков осадков и радиолокаторов), нежели суточные данные стандартных осадкомеров. Опыт совместного использования данных осадкомеров и плювиографов развит только в отечественной практике расчетов стока методом предельной интенсивности.

## 3. Материалы и методы (методика исследований)

В настоящей работе приведены результаты совместного анализа материалов наблюдений над экстремальными ливнями как самостоятельным событием на метеостанциях Уральского УГМС с рядами наблюдений более 20 лет, измеренными на осадкомерах (данные 192 метеостанций за период с 1890 по 2015 г.) и на плювиографах (данные 41 метеостанции за период с 1961 по 2015 г.).

В качестве исходных данных по каждой метеостанции использованы ряды максимальных в году суточных сумм осадков ( $D$ , мм) и максимальных в году сумм осадков за расчетные ливни количеством более 10 мм ( $R$ , мм) с периодом совместных наблюдений более 25 лет. Установлено, что продолжитель-

ность ливней по метеостанциям не обнаруживает связи с суммой осадков за единичные ливни. Подавляющее большинство ливней (98%) имеет продолжительность менее суток.

Материалы по суточным максимумам осадков включают 4-срочные (до 1986 г.) и 2-срочные (после 1986 г.) наблюдения. Ранее авторами выявлено соответствие временных рядов данных о ливневых осадках лог-нормальному закону распределения, использованному при выполнении расчетов. Оценка стационарности рядов  $D$  и  $R$  с использованием  $t$ - и  $F$ -критериев показала отсутствие нарушений по большинству метеостанций. В ходе анализа временных рядов установлено, что по 95% пунктов наблюдений средние суточные суммы осадков  $\bar{D}$  превышают средние суммы осадков за ливни  $\bar{R}$  на 17% (от 1 до 50%). По 5% пунктов  $\bar{R} > \bar{D}$  на величину не более 5%. Вероятностное распределение величин  $R_i/D_i$  (сумм осадков за ливень  $R$  и за сутки  $D$  в год наблюдений  $i$ ) следующее: в 1% случаев соотношение составляет 1,88, в 5% — 1,38, в 10% — 1,17, в 17% — 1,00. В среднем из числа всех лет наблюдений по всем пунктам суммы осадков за ливень превышают суточные суммы в 17% случаев (от 0 до 35% по данным разных метеостанций). В отношении экстремальных сумм осадков с обеспеченностью значений 5% и менее подобное превышение наблюдается в 90% случаев. Результаты анализа косвенно указывают на неправомерность однозначного использования в расчетах стока исключительно данных о суточных максимумах осадков 1%-ной обеспеченности вместо осадков за единичные ливни.

Отмеченные расхождения не могут быть объяснены различиями в приборных погрешностях измерений, хорошо изученных для осадкомеров [1, 2, 4, 15, 22, 23] и очень мало — для пловниографов [2, 3, 6, 15, 26].

Основные погрешности измерения сумм осадков на пловниографах связаны с разбрызгиванием — от -10 до 30% [1] (на осадкомерах 1—2%, [22]); с ветровым недоучетом при скорости ветра 10 м/с — от 4% (для осадков интенсивностью более 0,2 мм/мин) до 38% (менее 0,03 мм/мин), что на 10—15% больше, чем у осадкомеров [2, 22]; с испарением (менее 0,5% суммы осадков за сутки или за ливень у обоих приборов).

#### 4. Результаты

По анализируемым метеостанциям для рядов  $R_i$  и  $D_i$  определены статистические параметры распределения и рассчитаны квантили обеспеченностью 1 и 10% ( $R_{1\%}$ ,  $D_{1\%}$  и  $R_{10\%}$ ,  $D_{10\%}$ ) (таблица). Временные ряды  $R_i$  в среднем характеризуются в 1,4 раза большими коэффициентами вариации ( $C_v$ ) по сравнению с рядами  $D_i$ , тогда как отношения  $C_s/C_v$  для анализируемых рядов в среднем равны.

По соотношению  $R_{1\%}/D_{1\%}$  анализируемые метеостанции разбиты на две группы:  $R_{1\%}/D_{1\%} > 1$  — т. е. суммы осадков за расчетные ливни превышают суточные суммы осадков (56% пунктов), средняя величина этого отношения составляет 1,8;  $R_{1\%}/D_{1\%} \leq 1$ , средняя величина — 0,95. Иными словами, для метеостанций первой группы суммы осадков за расчетные ливни превышают суточные максимумы, а для метеостанций второй группы — различаются на величину не более 10% (т. е. соответствуют требованиям [11]). Величины  $R_{1\%}$  и  $D_{1\%}$  линейно связаны для каждой группы станций (рис. 2) и характеризуются коэффициентами корреляции  $r = 0,92$  для станций первой группы и  $r = 0,96$  — для второй. Подобные зависимости установлены и для других обеспеченностей величин

**Расчетные параметры временных рядов наибольших в году сумм осадков за сутки и единичные ливни для метеостанций с периодами наблюдений более 40 лет**

Метеостанция	n	H, м	D, мм						R, мм					R <sub>1%</sub> /D <sub>1%</sub>
			N	C <sub>v</sub>	C <sub>s</sub> /C <sub>v</sub>	D <sub>1%</sub>	D <sub>10%</sub>	N	C <sub>v</sub>	C <sub>s</sub> /C <sub>v</sub>	R <sub>1%</sub>	R <sub>10%</sub>		
Артемовский	54	154	36,2	0,45	2,3	89	60	32,3	0,47	2,4	88	57	1,0	
Березники	41	219	32,4	0,27	1,9	58	43	24,9	0,36	0,8	51	39	0,9	
Бисер	65	463	35,8	0,44	5,8	90	53	36,9	0,67	4,4	135	62	1,5	
Бутка	53	106	31,9	0,36	1,8	66	48	25,5	0,44	2,5	64	43	1,0	
Вая	55	183	33,6	0,37	5,9	62	46	32,8	0,53	5,3	65	48	1,0	
Верх. Дуброво	62	287	39,0	0,39	3,2	93	62	35,8	0,74	3,2	142	73	1,5	
Верх. Уфалей	62	392	36,0	0,38	2,9	83	57	26,0	0,48	3,0	70	46	0,8	
Верхнеуральск	54	401	31,4	0,44	1,4	69	50	29,7	0,69	3,4	104	58	1,5	
Верхотурье	43	124	34,8	0,41	2,9	82	56	33,5	0,47	1,9	90	58	1,1	
Гари	48	128	34,3	0,36	1,1	69	53	29,1	0,47	1,4	74	53	1,1	
Екатеринбург	63	281	36,8	0,45	2,3	90	61	32,6	0,43	1,8	80	55	0,9	
Злаугоуст	62	532	36,4	0,37	1,3	77	56	30,1	0,44	0,9	70	51	0,9	
Ивдель	64	93	32,8	0,41	2,2	74	52	29,5	0,49	2,3	83	64	1,1	
Каргалы	54	298	36,3	0,49	3,0	100	64	29,6	0,60	3,1	100	56	1,0	
Красноуфимск	65	205	31,9	0,35	2,1	68	48	29,6	0,62	3,8	102	58	1,5	
Кунгур	60	153	30,5	0,35	2,8	65	46	26,0	0,57	1,6	78	51	1,2	
Кын	45	244	34,4	0,39	4,0	80	54	25,5	0,66	2,9	100	48	1,3	
Памятная	43	66	33,0	0,46	3,7	90	66	28,3	0,55	2,3	86	64	1,0	
Пермь	49	171	31,6	0,36	2,2	67	54	26,6	0,43	0,9	66	52	1,0	
Североуральск	43	208	35,2	0,40	1,7	73	50	30,7	0,63	3,3	95	61	1,3	
Тугулым	40	89	37,5	0,54	3,3	109	67	28,8	0,48	3,1	106	52	1,0	
Челябинск	58	234	32,5	0,42	4,4	90	53	32,0	0,69	3,1	122	60	1,4	

*Примечание.* n — период наблюдений; H — высота; D — сумма осадков за сутки, данные осадкомера; R — сумма осадков за ливень, данные плювиографа; N — норма.

R<sub>p, %</sub> и D<sub>p, %</sub>, однако их качество хуже (для 10%-ных величин r уменьшается до 0,76—0,86, а для средних многолетних — до 0,66). Коэффициенты вариации C<sub>v</sub> и асимметрии C<sub>s</sub> рядов R<sub>i</sub> и D<sub>i</sub> связаны менее тесно (рис. 2): для C<sub>v</sub> коэффициент корреляции r изменяется от 0,49 до 0,65, для C<sub>s</sub> — от 0,46 до 0,73.

Основной причиной выявленных расхождений, обозначенной выше, следует считать несовпадение стандартных сроков метеорологических наблюдений (суммарные измерения каждые 12 ч на осадкомерах) со сроками выпадения дождей (непрерывные измерения на плювиографах без привязки к срокам) и неполную фиксацию внутри метеорологических суток сумм осадков за ливни, выпадающие вечером и ночью. В связи с этим выполнен анализ синоптических условий, определяющих формирование ливневых осадков летом.

Формирование ливней на Урале связано с прохождением фронтов, заполняющимися высотными циклонами и конвективными движениями воздушных масс [12, 16, 17, 19]. Интенсивные фронтальные осадки наблюдаются в периоды прохождения южных и юго-западных циклонов (весной и осенью). В летние

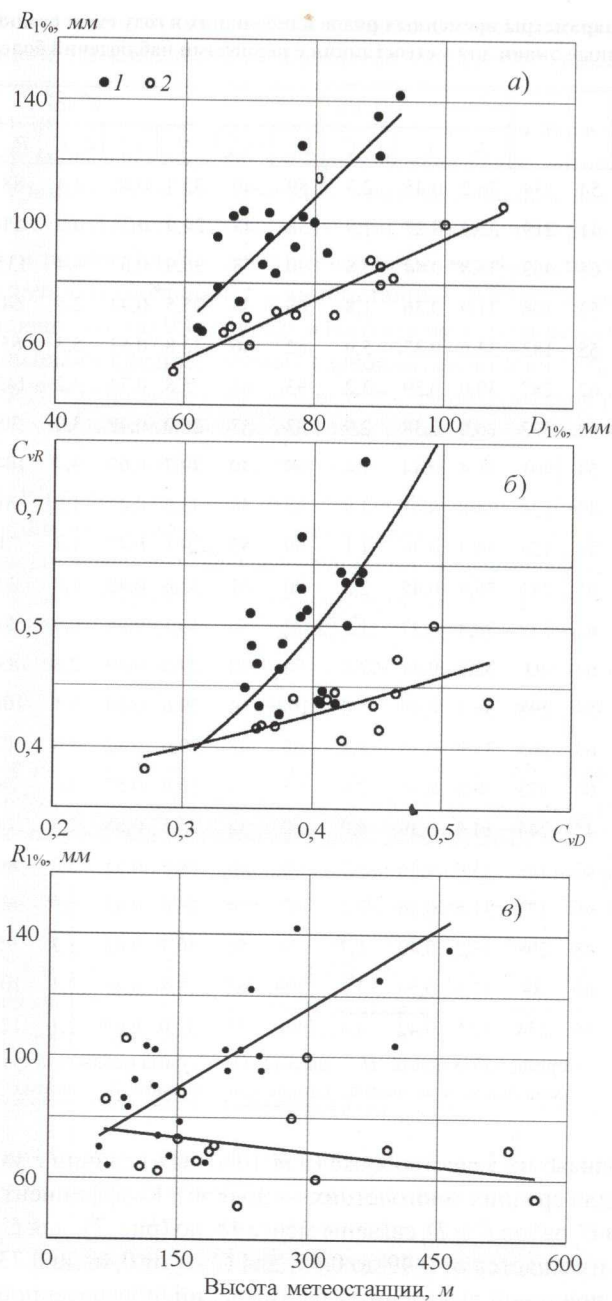


Рис. 2. Графики связи 1%-ных сумм осадков за единичные ливни ( $R_{1\%, \text{ мм}}$ ) и за сутки ( $D_{1\%, \text{ мм}}$ ) (а); коэффициентов вариации сумм осадков за ливни ( $C_{vR}$ ) и за сутки ( $C_{vD}$ ) (б), обозначение точек: 1 — метеостанции, для которых выполняется условие  $R_{1\%} > D_{1\%}$ ; 2 — метеостанции, для которых  $R_{1\%} < D_{1\%}$ ; 1%-ных сумм осадков за единичные ливни ( $R_{1\%, \text{ мм}}$ ) с высотой метеостанции (в).

месяцы большинство ливней приурочено к конвективным комплексам, формирующимся днем и вечером и распадающимся ночью в условиях неустойчивой атмосферы, усиливающейся в условиях пересеченного рельефа горной части Урала.

Анализ данных 93 плувиографов показал, что количество ливней днем и вечером на равнинной части территории одинаково; в горной части около 80%

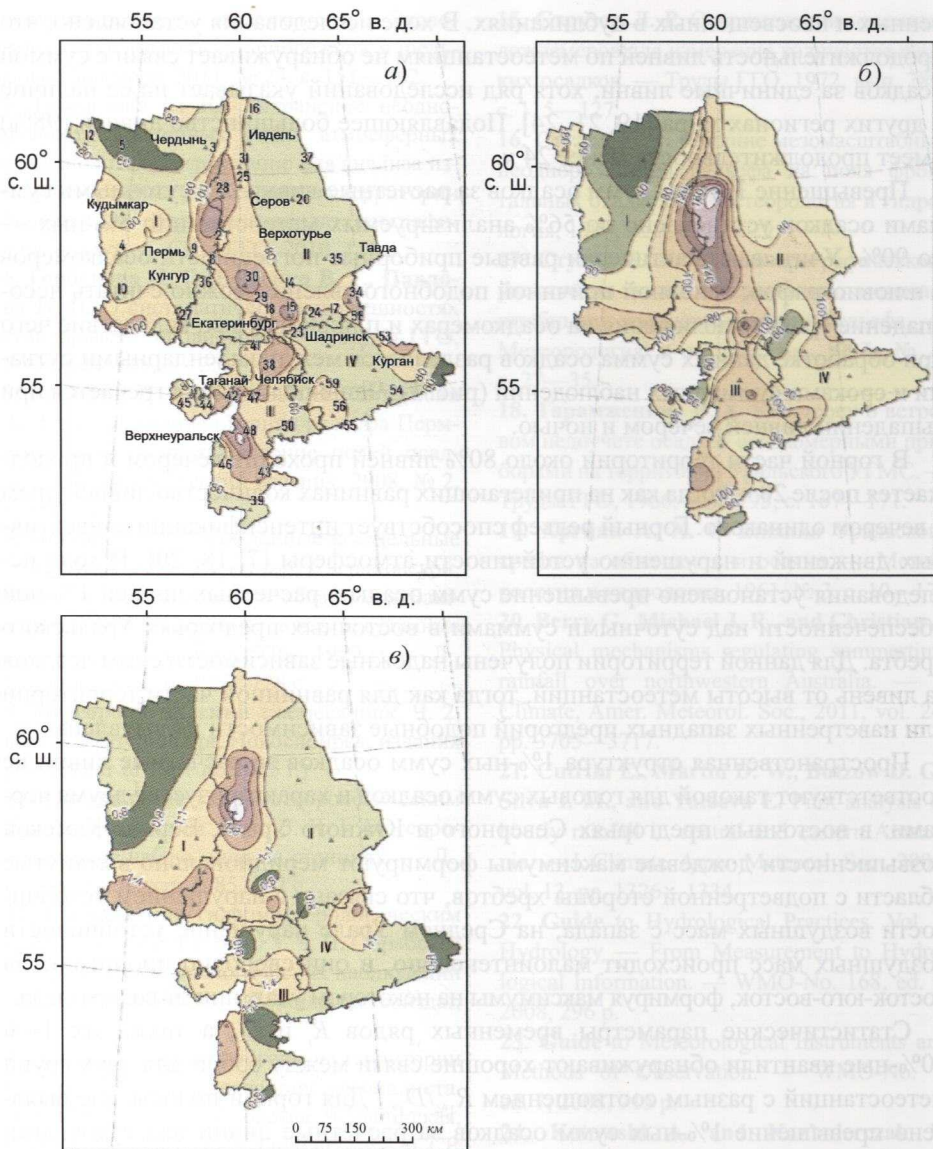


Рис. 3. Картограмма распределения характеристик сумм осадков обеспеченностью 1% в пределах территории деятельности Уральского УГМС: а) за сутки ( $D_{1\%}$ , мм); б) за единичные ливни ( $R_{1\%}$ , мм); в) соотношение величин  $R_{1\%}/D_{1\%}$ ; I — Свердловская область; II — Челябинская область; III — Курганская область; IV — Пермский край.

ливней проходит вечером и продолжается после 20 ч. Вывод о влиянии рельефа на особенности выпадения осадков подтверждают связи 1%-ных сумм осадков за ливень  $R_{1\%}$  (мм) с высотой  $H$  (м): для метеостанций первой группы получена надежная ( $r = 0,74$ ) зависимость  $R_{1\%} = f(H)$ ; для метеостанций 2-й группы зависимость отсутствует (рис. 2).

### 5. Обсуждение и выводы

Вопросы увязки данных наблюдений осадкомера и плувиографа за календарные и некалендарные временные интервалы относятся к разряду мало изу-

ченных и неосвещенных в публикациях. В ходе исследования установлено, что продолжительность ливней по метеостанциям не обнаруживает связи с суммой осадков за единичные ливни, хотя ряд исследований указывает на ее наличие в других регионах мира [19, 21, 24]. Подавляющее большинство ливней (98%) имеет продолжительность менее 24 ч.

Превышение 1%-ных сумм осадков за расчетные ливни над суточными суммами осадков установлено по 56% анализируемых метеостанций; 5%-ных — по 90%. Учитывая практически равные приборные погрешности осадкомеров и плuviографов, основной причиной подобного явления можно считать несоответствие сроков наблюдения на осадкомерах и плuviографах, вследствие чего при обработке данных сумма осадков разделяется между календарными сутками и сроками суммарных наблюдений (рис. 1). Чаще подобное встречается при выпадении ливней вечером и ночью.

В горной части территории около 80% ливней проходит вечером и продолжается после 20 ч, тогда как на прилегающих равнинах количество ливней днем и вечером одинаково. Горный рельеф способствует интенсификации конвективных движений и нарушению устойчивости атмосферы [7, 18, 20]. В ходе исследования установлено превышение сумм осадков расчетных ливней 1%-ной обеспеченности над суточными суммами в восточных предгорьях Уральского хребта. Для данной территории получены надежные зависимости сумм осадков за ливень от высоты метеостанций, тогда как для равнинной части территории или наветренных западных предгорий подобные зависимости не выявлены.

Пространственная структура 1%-ных сумм осадков за расчетные ливни не соответствуют таковой для годовых сумм осадков и характеризуется двумя чертами: в восточных предгорьях Северного и Южного Урала, Верхне-Камской возвышенности дождевые максимумы формируют меридионально вытянутые области с подветренной стороны хребтов, что связано с нарушением устойчивости воздушных масс с запада; на Среднем Урале нарушение устойчивости воздушных масс происходит малоинтенсивно, и они свободно проникают на восток-юго-восток, формируя максимумы на некотором удалении от водораздела.

Статистические параметры временных рядов  $R_i$  и  $D_i$ , а также их 1- и 10%-ные квантили обнаруживают хорошие связи между собой для двух групп метеостанций с разным соотношением  $R_{1\%}/D_{1\%}$ . Для горной полосы, где выявлено превышение 1%-ных сумм осадков за расчетные ливни над суточными максимумами в 1,3—2,5 раза, в расчетах паводочного стока рекомендуется использовать данные за расчетный ливень. Подобный подход реализован рядом зарубежных исследователей в моделях паводочного стока.

## Литература

1. Богданова Э. Г. Использование стандартной метеорологической информации для определения режимных характеристик продолжительности и интенсивности осадков. — Труды ГГО, 1982, вып. 461, с. 36—44.
2. Богданова Э. Г. Исследование ветровой погрешности измерения осадков. — Труды ГГО, 1966, вып. 195, с. 40—62.
3. Богданова Э. Г., Горбунова И. Г., Макаров Ю. В. Погрешности определения интенсивности дождей с помощью стандартного плuviографа. — Труды ГГО, 1978, вып. 416, с. 20—35.
4. Букатов А. Е., Павленко Е. А. Оценка влияния нарушений однородности рядов климатических данных на определение характеристик изменчивости атмосферных

осадков в регионе Азовского моря. — Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря, 2011, № 24, с. 151—162.

**5. Гаврилова С. Ю.** Устранение неоднородности временных рядов атмосферных осадков и их использование для анализа изменений режима увлажнения на территории России. /Диссертация... кандидата географических наук. — СПб, ГГО, 2010, 111 с.

**6. Горбунова И. Г., Боженко В. Г., Павлова Н. П.** О систематических погрешностях стандартного плувиографа. — Труды ГГО, 1968, вып. 215, с. 125—134.

**7. Калинин Н. А., Фрик Л. В., Смирнова А. А.** Исследование влияния рельефа Пермского края на распределение полей осадков. — Географический вестник, 2008, № 2, с. 187—195.

**8. Метеорологические данные** за отдельные годы. Вып. 9. По Пермской, Свердловской, Челябинской, Курганской областям и Башкирской АССР. Ливневые дожди и суточные количества осадков за 1936—1959 гг. — Л., Гидрометеиздат, 1962, 728 с.

**9. Метеорологический** ежемесячник. Ч. 2, вып. 9. Екатеринбург, Новосибирск, издания разных лет (с 1961 по 2015 г.)

**10. Наставление** гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3. Ч. I. Метеорологические наблюдения на станциях. — Л., Гидрометеиздат, 1985, 302 с.

**11. Наставление** гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3. Ч. II. Обработка материалов метеорологических наблюдений (РД 52.04.614-2000). — Л., Гидрометеиздат, 2000, 90 с.

**12. Опасные явления погоды** на территории Сибири и Урала: справочник специалиста. Ч. 3. Пермская, Свердловская, Челябинская, Курганская области и Башкирская АССР. /Под ред. С. Д. Кошинского, А. Д. Дробышева. — Л., Гидрометеиздат, 1987, 200 с.

**13. Свод правил** по проектированию и строительству. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. — М., Госстрой России, 2004, 74 с.

**14. Свод правил** по проектированию и строительству. СП 32.13330.2012. Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85 (с изменением № 1). — М., Госстрой России, 2013, 87 с.

**15. Струзер Л. Р.** О применении наземных дождемеров для измерения количества жидких осадков. — Труды ГГО, 1972, вып. 280, с. 115—127.

**16. Стулов Е. А.** Влияние мезомасштабных неоднородностей рельефа на поля фронтальных осадков. — Метеорология и гидрология, 1994, № 3, с. 20—29.

**17. Стулов Е. А.** Оценка орографического увеличения жидких осадков над мезомасштабными неоднородностями рельефа. — Метеорология и гидрология, 1997, № 5, с. 27—35.

**18. Тарамженина В. А.** К вопросу о ветровом недоучете осадков осадкомерными приборами на территории Уральского УГМС. — Труды ГГО, 1966, вып. 195, с. 167—171.

**19. Хргиан А. Х.** О влиянии Уральского хребта на облачность и осадки. — Метеорология и гидрология, 1961, № 3, с. 10—17.

**20. Berry G., Michael J. R., and Christian J.** Physical mechanisms regulating summertime rainfall over northwestern Australia. — J. Climate, Amer. Meteorol. Soc., 2011, vol. 24, pp. 3705—3717.

**21. Cutrim E., Martin D. W., Butzow D. G., Silva I. M., and Yulaeva E.** Pilot analysis of hourly rainfall in central and eastern Amazonia. — J. Climate, Amer. Meteorol. Soc., 2000, vol. 13, pp. 1326—1334.

**22. Guide to Hydrological Practices.** Vol. I. Hydrology — From Measurement to Hydrological Information. — WMO-No. 168, ed. 6, 2008, 296 p.

**23. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation.** — WMO-No. 8, ed. 7, 2008, 715 p.

**24. Kotowski A. and Kaz'mierczak B.** Probabilistic models of maximum precipitation for designing sewerage. — J. Hydrometeorol., 2013, vol. 14, pp. 1958—1965.

**25. Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation.** — Geneva, World Meteorological Organization. Second Edition, Operational Hydrology Report No. 1, WMO-No. 332, 1986, 269 p.

**26. Sanson J. and Thomson P. J.** Rainfall classification using breakpoint pluviograph data. — J. Climate, Amer. Meteorol. Soc., 1992, vol. 5, pp. 755—764.

Поступила в редакцию 19 XII 2016 г., после доработки 3 V 2017 г.

## Экстремальные штормы вблизи Курильских островов по данным визуальных и инструментальных измерений

Г. В. Шевченко\*, М. О. Хузеева\*\*, В. Е. Ячменев\*, А. А. Шишкин\*

*Проанализированы материалы многолетних визуальных наблюдений за волнением на береговых гидрометеостанциях Южно-Курильск (о. Кунашир) и Малокурильское (о. Шикотан). Показано, что наибольшая интенсивность волнения наблюдается в период с октября по январь. Выявлено резкое увеличение числа экстремальных штормов в последнее десятилетие. Рассмотрены материалы инструментальных измерений волновых процессов в бухтах о. Шикотан, включавшие экстремальные штормы 17–18 декабря 2014 г. и 8–9 октября 2015 г. В бухте Димитрова со стороны океана выявлено существенное различие в преобладающих периодах волнения при летних (7–9 с) и осенних (9–15 с) штормах. Отмечены вариации периода спектрального максимума при экстремальном шторме 17–18 декабря 2014 г. с 8–9 до 16–18 с, а затем вновь до 10 с по мере развития шторма, а также заметный вклад ветрового волнения с периодами 4–6 с, не наблюдавшийся при более слабых штормах. Обнаружены вариации спектрального максимума волнения в бухте Малокурильская, синхронные с приливом. Выявлено значительное увеличение энергии в инфрагравитационном диапазоне (30–300 с) при сильных штормах. На диаграммах текущего спектра выделяются полосы на фиксированных частотах, отвечающие резонансным периодам бухт. На фазе наибольшего развития шторма происходит стохастизация волнового поля (спектр приобретает характер белого шума, резонансные пики не выражены).*

**Ключевые слова:** ветровое волнение, экстремальный шторм, визуальные наблюдения, инструментальные измерения волнения, Курильские острова, высота волн, период волнения, спектр.

### Введение

Данные о ветровом волнении необходимы для решения многих практических задач, таких как обеспечение безопасности судоходства и погрузо-разгрузочных работ в портах, гидротехническое строительство на морских побережьях, абразия берегов и организация берегозащиты и т. д. Также характеристики волнения необходимы для развития теории ветрового волнения применительно к конкретным условиям разных акваторий, усовершенствования методов расчета элементов волн в прибрежной зоне и прогнозирования опасных ситуаций.

На данный момент характер волнового режима в районе южной группы Курильских о-вов мало изучен. По данной тематике существует несколько крупных обобщений (например, [1, 3]). Как правило, в таких обобщениях данные о волнении в прибрежной части не представлены. А использование данных из

\* Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук; e-mail: g.shevchenko@imgg.ru.

\*\* Сахалинское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

этих работ для прибрежной части не совсем корректно в связи с другими условиями возникновения и деформации волн в прибрежной зоне, а также из-за сложности учета морфометрических характеристик прибрежной акватории.

Цель работы — анализ данных визуальных наблюдений на береговых гидрометеорологических станциях Малокурильское и Южно-Курильск, а также данных инструментальных измерений волнения в бухтах о. Шикотан.

### Материалы наблюдений

Накопленные в Сахалинском УГМС материалы многолетних наблюдений на прибрежных гидрометеостанциях за характеристиками ветрового волнения сведены в цифровую базу данных, позволяющую проводить статистический анализ [6].

В работе использованы данные ежедневных наблюдений за волнением на двух гидрометеорологических станциях, расположенных на побережье южной части Курильской гряды: в п. г. т. Южно-Курильск (о. Кунашир) и с. Малокурильское (о. Шикотан, рис. 1а). На первой из них измерения были начаты в 1954 г., на второй — в 1955 г. и производятся по настоящее время.

Для обеих станций считалась помесечная повторяемость ветрового волнения и волн зыби и формировались диаграммы распределения по градациям высоты и направлениям, которые строились для каждого месяца отдельно. Основное внимание было уделено ситуациям, когда в изучаемом районе наблюдались экстремальные штормы.

На о. Шикотан сотрудники Института морской геологии и геофизики в течение последних нескольких лет проводят инструментальные измерения волновых процессов путем постановки в бухтах Малокурильская и Крабовая со

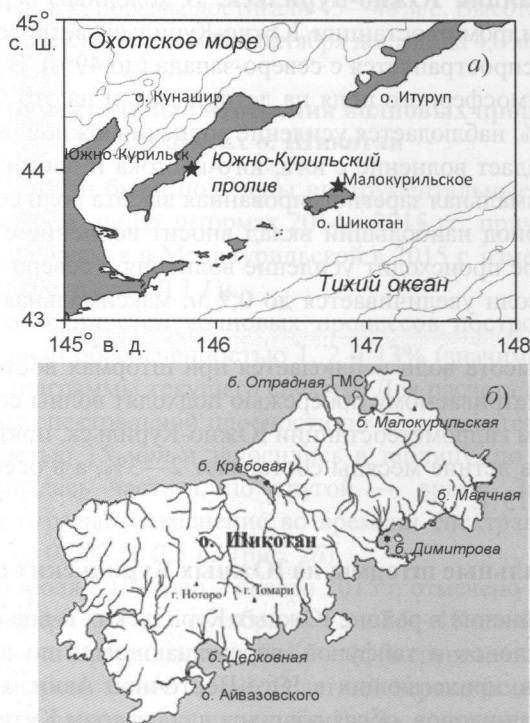


Рис. 1. Расположение береговых гидрометеостанций Южно-Курильск и Малокурильское (а) и автономных регистраторов волновых процессов ИМГиГ ДВО РАН в бухтах о. Шикотан (б).

стороны Южно-Курильского пролива и в бухтах Церковная и Димитрова на океанском побережье (рис. 1б) автономных донных станций с измерителями придонного гидростатического давления. Эти приборы предназначены для регистрации волн цунами, и обычно данные при записи в память усреднялись с периодом 1 мин. Однако в 2014—2015 гг. в некоторых случаях использовались измерители волнения и уровня АРВ К-14 с частотой опроса 1 Гц. Это позволило определять характеристики ветрового волнения (использовалась методика пересчета давления на дне к высоте поверхностных волн [4]).

### Сезонное распределение параметров волнения

**Гидрометеостанция Малокурильское.** С октября по март в районе гидрометеостанции Малокурильское преобладает волнение северо-западной четверти (в декабре его доля достигает 46,8%, в январе — 45%). Средняя высота волн — 0,8—1,1 м. Повторяемость сильного волнения (1,5 м и более) в октябре составляет 15,5%, в декабре — январе она увеличивается до 34,2%. Максимальная зарегистрированная высота волн — от 10 до 12 м.

В апреле штормовая активность начинает ослабевать, и к маю повторяемость штормового волнения снижается до 7%, однако максимальная высота волн может достигать 8 м. С мая по сентябрь преобладающим румбом остается южный (до 32%), среднемесячная высота волн составляет 0,4—0,5 м. Летом прибрежная акватория в районе гидрометеостанции Малокурильское наиболее спокойная, повторяемость штормового волнения уменьшается до 2—3%, к сентябрю она увеличивается до 8,1%. Максимальная высота волн в этот период находится в диапазоне от 5 до 8 м.

**Гидрометеостанция Южно-Курильск.** В холодный период (декабрь — март) в районе гидрометеостанции Южно-Курильск ветровое волнение преимущественно распространяется с северо-запада (до 49%). В апреле начинается перестройка атмосферного поля на летний тип, и на это направление приходится уже 28,5%, наблюдается усиление волнения южной четверти (20,7%).

Летом преобладает волнение с юга, юго-востока и востока со средней высотой 0,4 м, максимальная зарегистрированная высота волн составляет 2,5 м.

В осенний период наибольший вклад вносит волнение с юга и юго-запада, только в ноябре происходит усиление волнения с северо-западного румба. Средняя высота волн увеличивается до 0,7 м, максимальная высота волн составляет 5 м.

Наибольшая высота волн наблюдается при штормах восточного направления, когда к рассматриваемому побережью подходят волны со стороны Тихого океана. По данным гидрометеостанции Южно-Курильск, повторяемость штормового волнения в летние месяцы составляет 2—3%, а в осенние месяцы она увеличивается до 13%.

### Экстремальные штормы на Южных Курильских островах

Штормовое волнение в районе Южных Курильских о-вов формируется под воздействием циклонов и тайфунов, перемещающихся по акватории Тихого океана из районов, прилегающих к Юго-Восточной Азии, а также западных континентальных циклонов, образующихся над севером Китая и Забайкальем. Траектории этих циклонов проходят с запада на восток, они пересекают о. Сахалин в направлении Охотского и Берингова морей [3].

В последние 10 лет случаи прохождения циклонов и тайфунов, сопровождавшихся ураганным ветром и мощным штормовым волнением, заметно участились. Первый экстремальный шторм (согласно работе [2], подобных на Южных Курилах не наблюдалось около 50 лет) отмечен 7—10 октября 2006 г. Аналогичные ситуации были зафиксированы в январе 2006 г., декабре 2008 г., ноябре 2010 г., декабре 2014 г. и в октябре 2015 г. Рассмотрим две последние ситуации более подробно.

16—18 декабря 2014 г. наблюдался мощный циклон с давлением в центре 955 *гПа*. В Южно-Курильске и Курильске 17 декабря ветер усилился до 35—42 *м/с*, а порывы достигли 51 *м/с*. В течение дня циклон сместился к западу вдоль северо-восточного побережья о. Хоккайдо. В ночь на 18 декабря циклон совершил разворот на юго-восток и утром 18 декабря начал смещаться в Тихий океан. Высота волн в бухте Южно-Курильская 17 декабря достигала 4 м — наибольшей величины за весь период наблюдений. Порт Южно-Курильска и прибрежная часть поселка, примыкающая к устью р. Серебрянка, были затоплены, на нескольких участках наблюдались размывы автомобильной дороги. Хозяйству был нанесен существенный материальный ущерб. По экспертной оценке, высота нагонной волны составила около 1 м, что также является наибольшим показателем за последние 70 лет.

Шторм 8—9 октября 2015 г. в районе Южных Курильских о-вов был вызван тайфуном Чой-Ван, который образовался в Тихом океане в тропических широтах и смещался в северо-западном и северном направлении. 8 октября центр циклона располагался в районе Южных Курильских о-вов, давление в центре составило 955 *гПа*. По данным наблюдений гидрометеостанции Малокурильское, на побережье о. Шикотан наблюдался штормовой ветер северо-восточного направления со скоростью 16—24 *м/с*, порывы достигали 45—48 *м/с*. Высота ветровых волн со стороны Южно-Курильского пролива 8 октября достигала 4,0 м.

### Инструментальные измерения волновых процессов в бухтах о. Шикотан

В бухтах о. Шикотан были получены инструментальные записи волновых процессов при экстремальных штормах 2014—2015 гг., причем в бухте Димитрова — в обоих случаях, а в Малокурильской в 2015 г. измерения производились прибором АРВ с частотой 1 *Гц*.

Для анализа особенностей волновых процессов построены графики изменений высоты волн обеспеченностью 1, 2 и 13% (значимой высоты волны, рис. 2а), а также диаграммы текущего спектра. Для расчета последней рассчитывались значения спектральной плотности по последовательным фрагментам записи длительностью 15 *мин* и заносились в таблицу, по одной координате которой откладывалась частота, по другой — время. Заполненная таким образом матрица отражает изменение во времени спектральной плотности в диапазоне частот от 0,002 до 0,5 *Гц* (рис. 2б).

За период с 26 июля 2014 г. по 2 января 2015 г. отмечено 12 штормовых ситуаций, из которых три (16—17 октября, 1—3 и 16—18 декабря 2014 г.) можно отнести к сильным штормам, остальные были умеренными (значимая высота волн в бухте Димитрова менее 0,5 м). В летний период основной максимум в спектре приходился на периоды волн зыби 7—9 с, осенью преобладала более низкочастотная зыбь с периодами 9—15 с, роль ветрового волнения была незначительна.

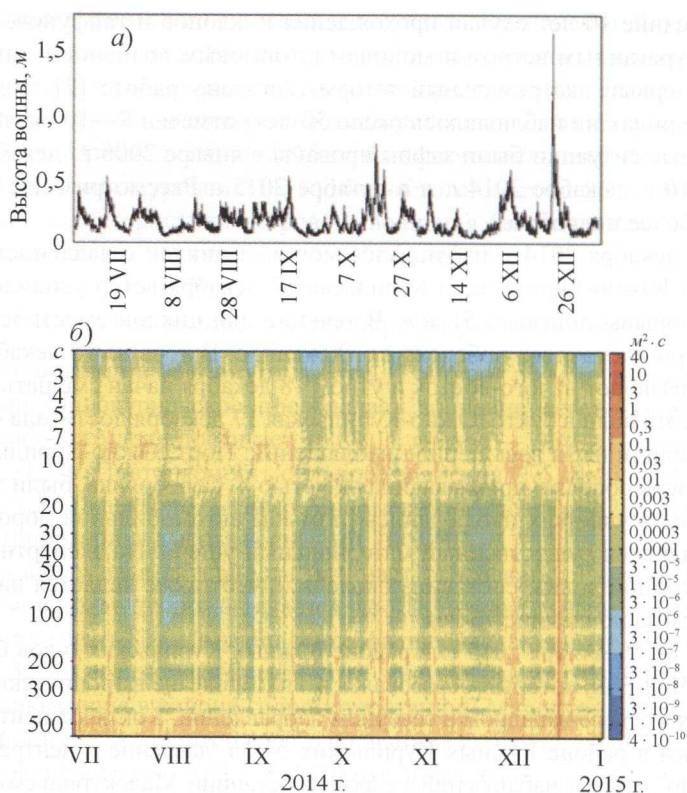


Рис. 2. График значимой высоты волны (а) и диаграмма текущего спектра (б) по измерениям волнения в бухте Димитрова (океанское побережье о. Шикотан) за период с 26 июля 2014 г. по 2 января 2015 г.

При шторме 16—17 декабря 2014 г. значимая высота волн достигала достаточно скромной отметки — 1,7 м, что, однако, вдвое больше, чем второй максимум за примерно полугодовой интервал наблюдений, зафиксированный при достаточно сильном шторме в октябре того же года. Вероятно, в данном случае повлияло положение регистратора в закрытой от прямого действия волнения части бухты.

Анализ диаграммы текущего спектра показал, что на начальной стадии развития шторма спектральный максимум приходился на периоды 8—9 с, затем сместился в низкочастотную область (17—18 с), при этом возник второй максимум на периодах 4—6 с. Это была одна из немногих ситуаций, когда ветровое волнение играло существенную роль в бухте Димитрова.

Еще одной особенностью рассматриваемой штормовой ситуации было существенное возрастание энергии в диапазоне инфрагравитационных волн (30—300 с). На диаграммах текущего спектра выделяются устойчивые полосы на периодах 2,2, 3,3 и 4,8 мин, присутствующие как в спокойную, так и в штормовую погоду (относительная выраженность этих максимумов при сильных штормах уменьшается, происходит стохастизация волнового поля — спектр длинноволновых колебаний в указанном диапазоне периодов приобретает характер, близкий к спектру белого шума). Устойчивость этих максимумов указывает на их топографический характер, эти периоды отвечают высокочастотным модам бухты [5].

В 2015 г. измерения в бухте Димитрова проводились с 24 мая по 22 октября, за этот период отмечено четыре сильных шторма, когда значимая высота волн

превышала 0,5 м (10—11 июня, 15—16 и 22—25 сентября, 8—9 октября). Отмечено аналогичное выявленному в 2014 г. различие спектральных максимумов волнения при штормах в летний и осенний периоды.

Экстремальный шторм 8—9 октября 2015 г. проявился несколько слабее по сравнению с рассмотренным выше событием, значимая высота волны достигла 1,4 м, наиболее интенсивные колебания сначала отмечены на периодах 8—9 с, после чего период спектрального максимума увеличивался до 17—18 с. Короткопериодное ветровое волнение, в отличие от декабрьского шторма, проявилось существенно меньше.

В более закрытую, расположенную на побережье Южно-Курильского пролива бухту Малокурильская волнение проникает еще более ослабленным, максимальная значимая высота волн при экстремальном шторме составила всего 0,5 м.

На диаграмме текущего спектра волнения выделяются две узкие полосы, отвечающие короткопериодному волнению и зыби. Для этих полос характерны существенные вариации частоты спектрального максимума, синхронные с колебаниями уровня моря (высоким значениям уровня отвечают более высокие частоты или более короткие периоды, а низким, соответственно, более низкочастотные волны). Период спектрального максимума волнения изменялся преимущественно от 5 до 7 с, а зыби — от 9 до 15 с. Сложно объяснить причину этого интересного явления, вероятнее всего, трансформация волнения на фазах прилива и отлива происходит в узкой горловине бухты.

Так же как и в бухте Димитрова, на диаграмме текущего спектра в бухте Малокурильская выделяются устойчивые полосы на периодах около 1,9, 3 и 4,8 мин. В отличие от рассмотренного выше бассейна, в Малокурильской бухте не наблюдалось стохастизации волнового процесса и существенного возрастания энергии в высокочастотной части спектра при максимальном развитии шторма.

В бухтах Крабовая и Димитрова были получены записи длинноволновых процессов с дискретностью 1 мин, что позволило изучить вариации их спектральных характеристик на разных стадиях развития шторма. В первой из них в спокойную погоду и на начальной фазе шторма в высокочастотной области спектра выделялись сравнительно слабые пики на периодах около 3, 4,5, 6 и 7,7 мин. При максимальном развитии шторма и на фазе ослабления на периодах менее 7 мин уровень энергии снизился, что довольно необычно; его заметное возрастание отмечено на периоде 7,8 мин.

В бухте Церковная перед штормом выделялся пик на периоде 7,5 мин, который при увеличении интенсивности волнения исчез, отмечены стохастизация волнового поля и появление пика на периоде 3 мин.

На береговом мареографе в бухте Малокурильская во время прохождения глубоких циклонов были зафиксированы значительные нагоны, максимальный подъем неперIODической составляющей уровня относительно нулевого среднего значения составил 63 см в декабре 2014 г. (что выше максимального значения за период наблюдений 1971—1994 гг. [7]) и 50 см в октябре 2015 г.

### Заключение

Анализ данных визуальных наблюдений за ветровым волнением на береговых гидрометеостанциях на Южных Курильских о-вах показал, что за последние 10 лет экстремальные штормы заметно участились. Наибольшая повторяемость сильного волнения отмечается в осенне-зимний период (октябрь — январь), летом интенсивность волнения уменьшается, что связано с особенностями атмосферных процессов.

В результате постановок автономных донных станций в 2014—2015 гг. в бухтах о. Шикотан были получены продолжительные инструментальные записи волнения и колебаний уровня моря. При анализе этих записей выявлен ряд аномальных ситуаций, наблюдавшихся при прохождении над Южными Курильскими о-вами глубоких циклонов и тайфунов, включая экстремальные штормы 17—18 декабря 2014 г. и 8—9 октября 2015 г.

В бухте Димитрова на океанской стороне острова выявлено существенное различие в преобладающих периодах волнения при летних (7—9 с) и осенних (9—15 с) штормах. Отмечены вариации периода спектрального максимума при экстремальном шторме 17—18 декабря 2014 г. с 8—9 до 16—18 с, а затем вновь до 10 с по мере развития шторма, а также заметный вклад ветрового волнения с периодами 4—6 с, не наблюдавшийся при более слабых штормах.

В бухте Малокурильская при экстремальном шторме 8—9 октября 2015 г., а также при обычных условиях погоды обнаружены вариации спектрального максимума волнения, синхронные с приливом. В бухте Димитрова подобные вариации выражены существенно меньше.

Выявлено значительное возрастание энергии в инфрагравитационном диапазоне (30—300 с) при сильных штормах. На диаграммах текущего спектра выделяются полосы на фиксированных частотах (в бухте Димитрова — на периодах 2,2 и 3,3 мин, в бухте Малокурильская — на периодах 1,9, 3 и 4,8 мин), отвечающие короткопериодным резонансным модам этих бассейнов [5]. На фазе наибольшего развития шторма происходит стохастизация волнового поля (спектр приобретает характер белого шума, резонансные пики не выражены).

При прохождении глубокого циклона 17—18 декабря 2014 г. на береговом мареографе в бухте Малокурильская зафиксирован экстремальный штормовой нагон высотой 63 см.

Полученные результаты могут быть использованы для обеспечения безопасности мореплавания в прибрежных водах Южных Курильских о-вов и для оценки воздействия экстремальных штормов на берега.

## Литература

1. Атлас волнения и ветра Тихого океана. — Л., Гидрометеиздат, 1968, 125 с.
2. Ганзей Л. А., Разжигаяева Н. Г., Харламов А. А., Ивельская Т. Н. Экстремальные шторма 2006—2007 гг. на о. Шикотан: воздействие на прибрежный рельеф и осадки. — Океанология, 2010, т. 50, № 3, с. 458—467.
3. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. IX. Охотское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. — СПб, Гидрометеоздат, 1998, 342 с.
4. Кабатченко И. М., Косьян Р. Д., Краицкий В. П., Серых В. Я., Шехватов Б. В. Опыт эксплуатации волнографа-мареографа ВМ-04. — Океанология, 2007, т. 47, № 1, с. 150—155.
5. Рабинович А. Б., Левянт А. С. Влияние сейшевых колебаний на формирование спектра длинных волн у побережья Южных Курил. — Океанология, 1992, т. 32, № 1, с. 29—38.
6. Хузеева М. О. Повторяемость штормового волнения в прибрежной части Южной Курильской гряды по данным наблюдений береговых гидрометеорологических станций. /В сб.: Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска. — Владивосток, Дальнаука, 2015, с. 381—385.
7. Шевченко Г. В. Штормовые нагоны на Курильских островах. /В сб.: Цунами и сопутствующие явления. — Южно-Сахалинск, ИМГиГ ДВО РАН, 1997, с. 106—116.

**В. В. Осечкин “Русско-английский толковый  
метеорологический словарь”.**  
СПб, ООО “Эль-Принт”, 2018, 391 с.

Международное сотрудничество в области метеорологии имеет длительную историю. Ведь погода не знает границ. Официально сотрудничество началось в 1873 г. после учреждения Международной метеорологической организации (ММО), в создании которой Россия принимала активное участие. В настоящее время сотрудничество продолжается в рамках Всемирной метеорологической организации (ВМО), куда входит и наша страна. Российские ученые и эксперты постоянно работают в разных органах ВМО, где основным языком секретариата — английский. Издания, посвященные вопросам метеорологии, публикуются в основном на английском, поэтому появление нового русско-английского или англо-русского метеорологического словаря вносит определенный вклад как в улучшение международного сотрудничества, так и в развитие метеорологической науки. Это, несомненно, относится и к рецензируемому словарю, который можно считать уникальным по своей структуре, подбору терминов и их определений.

Словарь по праву назван толковым, поскольку после перевода термина русского языка на английский подробно, но кратко описывается его смысл, соответствующий терминологии, используемой в современной метеорологической науке и технологии.

Заслуживает внимания подбор терминов, многие из которых имеют специфический характер и редко включаются в обычные словари. Это свидетельствует о глубоком знании автором словаря не только метеорологии, но и специфики английской речи, состоящей из большого количества непереводаемых словосочетаний — идиом. Знание идиоматических конструкций особенно важно при переводе с русского языка на английский. Для многих это представляет более сложную проблему также из-за недостаточного числа русско-английских словарей, особенно в области метеорологии.

Русско-английский словарь В. В. Осечкина содержит более 8000 метеорологических и географических терминов и их английских аналогов. Этого количества вполне достаточно для перевода научной литературы на английский язык, а толкование этих терминов, несомненно, будет способствовать углублению знаний читателей, особенно студентов и аспирантов.

Важно отметить, что составитель словаря и все, кто принимал участие в его подготовке, в частности, А. А. Васильев (научный редактор), К. Ш. Хайруллин (рецензент) и другие помогали или безвозмездно, или вкладывали свои средства, что заслуживает особой благодарности. Без их помощи пользователи словаря, особенно те, кто делает перевод научного текста с русского языка на английский, не имели бы такой возможности.

*Ю. П. Переведенцев*

**В. Н. Прямыцын “Отечественная  
гидрометеорология в годы Первой мировой  
и Гражданской войн (1914—1921 гг.)”.**  
СПб, Дмитрий Буланин, 2018, 336 с.

Рецензируемая книга, подготовленная историком гидрометеорологии, кандидатом военных наук, подполковником В. Н. Прямыцыным, посвящена малоизвестному и одному из наиболее сложных этапов развития отечественной гидрометеорологии в период Первой мировой и Гражданской войн.

Основное внимание в книге уделено вопросам участия гидрометеорологов в военных действиях и их деятельности в интересах вооруженных сил. Детально рассматриваются вопросы гидрометеорологического обслуживания авиации, флота, сухопутных войск, их артиллерии и химических команд, приводятся сравнительные данные с деятельностью военных гидрометеорологов соответствующего периода в Германии и Франции, раскрывается процесс становления военной гидрометеорологии как науки, а также роль ученого на фронте.

Повествование о гидрометеорологической службе и ее деятельности в рассматриваемый период дополняется описанием событий, происходивших в государстве и на фронтах, а также информацией о состоянии вооруженных сил. Для углубленного изучения проблемы в книге предусмотрены соответствующие ссылки и информативные приложения. Каждая глава завершается краткими выводами.

При написании книги была использована литература по истории отечественной и мировой гидрометеорологии, отчеты о деятельности Военного министерства, Главной физической обсерватории и Земского союза, Императорского все-российского аэроклуба, а также труды по военной истории России. Также были использованы материалы Российского государственного военно-исторического архива, Российского государственного военного архива и Российского государственного архива Военно-морского флота.

Презентация книги состоялась 1 июня 2018 г. в Москве в рамках книжного фестиваля “Красная площадь — 2018”. В мероприятии приняли участие историки, представители гражданских и военных гидрометеорологических учреждений, а также профильных учебных заведений. Книга будет интересна гидрометеорологам, преподавателям образовательных учреждений, историкам периода Первой мировой и Гражданской войн, а также всем, кто неравнодушен к истории России.

*А. А. Васильев*

## Российский национальный юниорский водный конкурс

Российский национальный юниорский водный конкурс проводится с 2003 г. при поддержке Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации для поощрения инициативы школьников, направленной на решение проблем охраны и восстановления водных ресурсов России. Победитель общероссийского этапа получает право представлять нашу страну на международном юниорском водном конкурсе в Стокгольме. За 16 лет в национальном конкурсе приняли участие 28 500 старшеклассников из 85 регионов, представивших почти 20 тысяч научно-исследовательских и прикладных проектов. В 2018 г. в конкурсе участвовали 1990 школьников из 81 региона нашей страны, выполнивших 1660 проектов. В 2017 г. шесть победителей и призеров Конкурса получили гранты Президента Российской Федерации на обучение в высших учебных заведениях.

Цель Конкурса — поддержка научно-исследовательской и проектной деятельности российских школьников в сфере охраны, восстановления и рационального использования водных ресурсов, направленной на решение задач устойчивого водопользования, в том числе проблем водоподготовки и очистки загрязненных стоков, сохранения водного биоразнообразия, исследования корреляций водных, социальных, климатических и других факторов, а также форсайт-исследований.

Организатор конкурса — автономная некоммерческая организация “Институт консалтинга экономических проектов”, директор которого Н. Г. Давыдова является руководителем Конкурса.

Российский национальный юниорский конкурс входит в Перечень конкурсных мероприятий Минобрнауки, направленных на развитие интеллектуальных и творческих способностей подрастающего поколения в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 17 ноября 2015 г. № 1239. В Российской Федерации Конкурс признан лучшим образовательным проектом по продвижению идей рационального водопользования.

В рамках Конкурса учреждены разные номинации, в том числе в 2012 г. совместно с Научно-исследовательским центром космической гидрометеорологии “Планета” учреждена премия “За использование методов космического мониторинга в проектах по охране и восстановлению водных ресурсов” (премия присуждается школьнику и педагогу).

Победителем номинации НИЦ “Планета” Конкурса-2018 стал коллектив авторов Д. В. Поздняков, А. К. Горохов, К. Г. Горохов из Хабаровска (Муниципальное автономное учреждение дополнительного образования “Детский эколого-биологический центр”), авторы проекта “Использование программы Google Earth при изучении водной флоры”.

1 октября 2018 г. будет объявлен Конкурс-2019.

Контакты: 125319, г. Москва, ул. Черняховского, 17а, Институт консалтинга  
Тел.: (495) 589-65-22, (929) 915-71-35

E-mail: [russia@water-prize.ru](mailto:russia@water-prize.ru), [eco.epci@gmail.com](mailto:eco.epci@gmail.com)

Сайт: [ww.eco-project.org](http://ww.eco-project.org)

Положение о конкурсе и полная информация приведены на сайте <http://водный.конкурс.рф>.

*Н. Г. Давыдова*

## Использование программы “Google Earth” при изучении водной флоры

Д. В. Поздняков\*, А. К. Горохов\*, К. Г. Горохов\*

*Рассматривается возможность использования программы “Google Earth” при изучении водной флоры Приамурья на примере видов, внесенных в Красную книгу Хабаровского края. Анализируются особенности проведения полевых водно-флористических исследований в Приамурье, требующих предварительной работы с программой. Приводятся данные оценки надежности их применения в геоботанических исследованиях. Описываются возможности программы, даются конкретные примеры ее использования при проведении комплексных полевых исследований разной тематики (подбор объектов, определение траекторий движения, тактики мероприятий и т. д.), а также результаты таких исследований. Приводятся примеры применения архивных снимков программы с целью выявления динамики произрастания некоторых видов растений, а также общие методики проведения подобных исследований.*

**Ключевые слова:** водные растения, спутниковые снимки, полевые исследования, охраняемые, редкие растения.

### Введение

Своеобразие реликтовых форм растительности на территории Дальнего Востока, в том числе водной и прибрежной флоры, было отмечено почти всеми исследователями этого региона. Представителями так называемой тропической флоры являются лотос Комарова, эвриала устрашающая, бразения Шребера и ряд других [1, 8]. Несмотря на 300-летний период изучения флоры Дальнего Востока, и сейчас недостаточно сведений о гидрофильной флоре Приамурья — до недавнего времени отсутствовали сводки о видовом составе водных и прибрежных растений, не проводились комплексные исследования состояния и динамики популяций ряда видов растений [3, 8]. При этом многие из гидрофильных растений Приамурья относятся к редким и охраняемым видам. Особенно уязвимы растения, произрастающие на самой северной и северо-восточной границах ареала, часть из которых является третичными реликтовыми видами. В Красную книгу Хабаровского края из рассматриваемой экологической ниши внесено 15 видов растений, в том числе 5 видов категории редкости I, что составляет всего лишь 5,9% из 238 видов покрытосеменных, внесенных в перечень охраняемых видов, и 33,3% видов покрытосеменных, имеющих категорию редкости I [2, 7].

В отличие от работ, проведенных в полевых условиях многих западных и центральных областей нашей страны, исследование водной флоры Приаму-

\* Муниципальное автономное учреждение дополнительного образования “Детский эколого-биологический центр”, Хабаровск; e-mail: himavari\_24@mail.ru.

рья, особенно видов, внесенных в Красную книгу Хабаровского края, связано с определенными трудностями. Так, значительная часть Среднеамурской низменности представляет подболоченные луга, плавневые и верховые болота, в том числе труднопроходимые и непроходимые. Именно на этих заболоченных участках водных объектов произрастает ряд видов водной флоры (категория редкости I) — альдрованда пузырчатая, бразения Шребера, кубышка японская, лотос Комарова, эвриала устрашающая.

Берега большинства равнинных и лесных мелких рек поросли труднопроходимой пойменной кустарниковой растительностью с доминированием ивы, спирея, рябинника, что затрудняет не только подход к берегам рек, но и выбор мест для стоянок. Кроме того, на отдельных участках рек ветки густоразросшего ивняка полностью смыкаются над водной гладью, и река уходит в густые заросли. Это представляет опасность прокола надувных судов, переворота лодок. Для прохождения таких участков требуется периодически прорубать заросли или производить обнос. Прямую угрозу не только безопасности, но и жизни участников сплавов по лесным и малым равнинным рекам представляют заломы — деревья, упавшие поперек русла реки. Пропил и обнос заломов требуют больших затрат времени. При этом каждый тайфун-ветровал и сильный паводок создают на реках новые препятствия. Кроме того, сильно расчлененный рельеф местности (особенно в предгорьях) приводит к стремительному подъему уровня воды в реках после проливных дождей. Скорость подъема воды может достигать 0,5—1,0 м/сут и более. Общий уровень подъема воды в паводок может составлять до 8—10 м при общей продолжительности паводка от нескольких дней до нескольких недель (и даже месяцев). В таких условиях работа экспедиции практически невозможна. Более того, паводки могут привести к исчезновению ряда видов в отдельных местах произрастания на многие годы. Все это свидетельствует о необходимости повышения требований не только к выбору плавсредств и методики подготовки их экипажей, но и к разработке тактики проведения исследований в полевых условиях. Так, при определении продолжительности экспедиции следует учитывать, что движение по руслу реки с учетом времени на прорубание, пропиливание и обнос не превысит 10 км в день, причем участок русла, пройденный месяц назад, в результате очередного ветровала может превратиться в непроходимый. В отдельных случаях это не позволяет проводить ежегодные наблюдения за динамикой состояния популяций отдельных видов на удаленных территориях. В связи с этим большое значение приобретает предварительный и текущий анализ картографического материала и спутниковых снимков местности (при составлении маршрута и плана выезда, геоботанических описаний и т. д.).

### Материалы и методы исследования

Проведение полевой экспедиции невозможно без применения топографических материалов. С их помощью выбирается маршрут, на карту наносятся места ботанических находок, рассчитываются протяженность перемещений, места расположения стоянок и т. д. Компас и рулетка помогают в составлении схем участков локального произрастания отдельных видов, определении пробных площадей. Такие схемы были составлены, например, при изучении кубышки японской (данный вид произрастает в нашей стране исключительно в бассейне р. Кия в Хабаровском крае и отдельных прилежащих водоемах). Все

большее применение в полевых ботанических исследованиях находят и беспилотные летательные аппараты (БЛА, дроны). С их помощью можно производить общую съемку местности, делать высококачественные детальные снимки водной поверхности, позволяющие оценить площадь произрастания отдельных видов водной флоры. Подобные работы по картированию площадей произрастания проводились авторами статьи при изучении лотоса Комарова в августе 2014, 2015 и 2016 гг. на искусственном водоеме Омега (район хутора Галкино, Хабаровский муниципальный район). Однако при использовании дрона возникает ряд трудностей. Поэтому авторы статьи при подготовке и обработке материалов полевых экспедиций стали использовать возможности программы “Google Earth”.

### Результаты и обсуждение

Кубышка японская встречается только на территории муниципального района имени Лазо Хабаровского края, в бассейне р. Кия и вблизи нескольких прилегающих озер, что делает это растение крайне интересным объектом для изучения [4—6]. Исследования проводились в ходе трех пятидневных сплавов и ежегодных выездов на отдельные участки русла и прилегающие водоемы в те же периоды (в августе 2015, 2016 и 2017 гг.). Общая протяженность сплавов составила около 90 км, количество водоемов — 12. Всего было закартировано около 20 участков произрастания вида (более масштабным работам помешала нестабильная паводковая обстановка). В связи с заболоченностью поймы р. Кия, наличием густой кустарниковой растительности по ее берегам, зарастанием русла реки, колебаниями уровня воды при обильных осадках в процессе подготовки и обработки результатов экспедиций авторы статьи активно использовали данные спутниковых снимков.

Наиболее удобной, доступной и универсальной программой для обработки полученных результатов явилась “Google Earth Pro”.

Во-первых, использование текущих и архивных снимков позволяет на обширных площадях определить участки речных русел и озера, поросшие водной растительностью. Однако в архиве программы для ряда территорий края нет ни одного снимка в летний период. Так, из 150 км русла р. Кия в муниципальном районе имени Лазо снимки, снятые в летний период со спутника, обнаружены для менее 60% участков речного русла (с учетом всех архивных съемок программы). Наличие подходящего по сезонности снимка еще не является условием достижения успеха. Например, удаленное озеро может быть местом произрастания не только кубышки японской, но и таких уникальных видов, как бразения Шребера, альдрованда пузырчатая, эвриала устрашающая, и просто может быть покрыто банальными рдестом и стрелолистом. Поэтому при организации полномасштабной экспедиции необходимы предварительные выезды на доступные участки местности или использование данных прошлых экспедиций в тех местах.

Следует отметить, что на спутниковом снимке произрастающие, часто моновидовыми массивами, кубышка, бразения, водяной орех, рдест, эвриала, лотос различаются оттенком цвета. Знание точного места произрастания того или иного вида позволяет более внимательно проанализировать снимок и отметить еще не исследованные водоемы, где растительность по цвету подходит для изучения. Кроме того, данные на снимках позволяют оптимизировать выбор

маршрута — пешего и на транспорте — к интересующим водоемам. Поскольку топографические карты местности, как правило, были созданы в 1980-х годах, за прошедшее время изменилась конфигурация местных дорог. Появившиеся дубовые релки, не отмеченные на картах, но присутствующие на снимках, облегчат выбор маршрута посреди болот. По снимку заранее можно определить участки речных русел, полностью уходящие в кустарниковые заросли, где интересующие авторов статьи виды растений не произрастают.

Во-вторых, программа позволяет производить масштабирование, измерение расстояния (в проекции и с учетом рельефа), площади, что значительно облегчает учетные работы, минимизирует погрешность вычислений.

Однако данные снимка не заменят результаты, полученные в условиях полевых работ. Так, по данным авторов статьи, ежегодно при изучении не более 40% выбранных водоемов подтверждаются предположения о произрастании тех или иных видов. В ходе комплексных исследовательских сплавов по рекам регулярно обнаруживают места произрастания представителей водной флоры из Красной книги, не выявленные по снимкам. Причиной может быть малое проективное покрытие. В момент съемки локальная популяция может оказаться скрыта под водой очередным паводком, однако быть видна сквозь водную поверхность в ходе сплава. Кроме того, отдельный участок произрастания может быть укрыт под нависающими ветвями прибрежных деревьев. Так, в ходе сплавов по р. Кия муниципального района имени Лазо Хабаровского края летом 2017 г. не только были подтверждены все предварительно нанесенные на снимок предполагаемые места произрастания кубышки японской, но и выявлены еще два участка, не обнаруженные на снимке из-за локальности и разреженности произрастания вида в них. Наглядный пример работы со снимком представлен на рис. 1 — фрагмент местности  $10 \times 15$  км с участком русла р. Кия, где произрастает кубышка японская, имеющая более насыщенный цвет, что отличает ее от других густо произрастающих водных растений. На рис. 1 черным цветом обозначены места обнаружения кубышки японской в ходе сплавов 2001 г.; синим — подтвержденные места произрастания по результатам сплава 2017 г. (все точки на

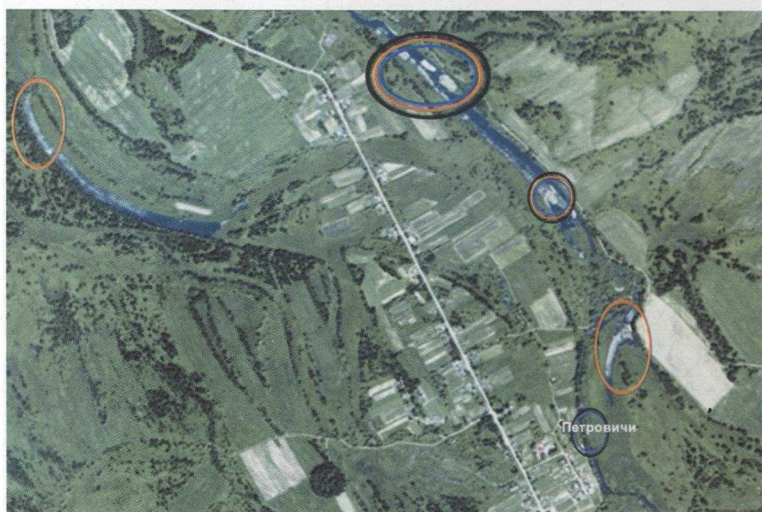


Рис. 1. Пример работы со снимком с помощью программы “Google Earth” (пояснения приведены в тексте).

этом участке русла сохранились); красным — не только выявленные сплавами места произрастания данного вида, но и два участка предположительного произрастания кубышки японской в близлежащих водоемах. Всего в ходе анализа результатов сплава осенью 2017 г. авторами статьи определено по снимкам и нанесено на топографическую карту местности 9 подобных мест.

Снимки также позволяют отслеживать динамику площади произрастания изучаемых видов на отдельных водоемах. Например, снимки стали незаменимыми при определении сроков и предполагаемых причин исчезновения кубышки японской в одном из озер поймы р. Кия (так называемом Генеральском). В ряде случаев результаты снимков свидетельствуют о прямой зависимости сокращения площадей произрастания редких видов водной флоры вследствие сельскохозяйственной деятельности человека. Аналогичные работы ведутся, например, при изучении популяции бразении Шребера в водоемах на территории Еврейской автономной области.

По снимкам можно определить не только площадь произрастания конкретного вида, но и комфортность условий. Иногда для проведения таких наблюдений требуется период в 15 лет. Использование программы для определения длины, площади и масштаба позволяет сокращать сроки и получать конкретные числовые значения. Например, о динамике площади популяции лотоса Комарова, произрастающего на искусственном водоеме Омега в Хабаровском муниципальном районе, за ряд предыдущих лет можно судить по данным снимка за 2017 г. (рис. 2). Видно, что общая площадь произрастания популяции постоянно увеличивалась, но при этом в центральной части ее колонии листья были поражены некрозом, и площадь распространения растения сокращалась. Причины данного явления станут ясны после анализа проб воды и грунта водоема и составления профиля его дна.

Таким образом, выбранная авторами статьи программа “Google Earth” не только удобна в использовании и включает обширную базу архивных снимков, но и доступна. На официальном сайте программа скачивается бесплатно, ее установочный объем даже в профессиональной версии меньше 200 Мб. Сним-



Рис. 2. Динамика площади популяции лотоса Комарова на искусственном водоеме в Хабаровском муниципальном районе в 2013 и 2014 гг.

ки местности легко привязываются к данным GPS-навигатора благодаря координатам, постоянно указывающим на географическое положение курсора на снимке. Понятное меню позволяет измерять протяженность прямых и ломаных линий на местности — как в проекции, так и с учетом рельефа. Программа позволяет сохранить изображение в высоком разрешении. Архивные фотографии имеют датировку, что важно при работе с водной растительностью.

Результаты работы получили хорошую оценку на краевых и всероссийских конкурсах. Данные исследований предоставлены в лабораторию экологии растений Института водных и экологических проблем Дальневосточного отделения Российской академии наук, а также специалистам кафедры “Биология, экология, химия” Тихоокеанского государственного университета.

## Литература

- 1. Ворошилов В. Н.** Флора советского Дальнего Востока (конспект с таблицами для определения видов). — М., Наука, 1966, 478 с.
- 2. Красная книга** Хабаровского края. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений и животных. / Официальное издание Министерства природных ресурсов Хабаровского края, Института водных и экологических проблем ДВО РАН. — Хабаровск, Издательский дом “Приамурские ведомости”, 2008, 632 с.
- 3. Крюкова М. В.** Конспект водно-прибрежной флоры Среднеамурской низменности (препринт). — Хабаровск, Дальнаука, 1999, 44 с.
- 4. Нечаев А. П.** Тайна японской кубышки. — Газета “Тихоокеанская звезда” от 30 сентября 1967 г.
- 5. Нечаев А. П., Павленко Г. Е.** *Nuphar japonicum* DC на юге Хабаровского края. — Ботанический журнал, 1969, т. 54, вып. 6, с. 931—933.
- 6. Павленко Г. Е.** Кубышки японская и малая на р. Кия (Хабаровский край). — Вопросы географии Дальнего Востока, 1972, № 10, с. 101—105.
- 7. Сапожникова Т. Г.** Редкие сосудистые растения Хабаровского края и их охрана. — Владивосток, Дальнаука, 1997.
- 8. Харкевич С. С., Качура Н. Н.** Редкие виды растений Советского Дальнего Востока и их охрана. — М., Наука, 1981, 232 с.

Поступила в редакцию 12 VII 2018 г.

## THE USE OF GOOGLE EARTH PROGRAM FOR STUDYING AQUATIC FLORA

D. V. Pozdnyakov, A. K. Gorokhov, and K. G. Gorokhov

*The possibility is considered of analyzing the Google Earth program for studying aquatic flora of the Amur River by the example of species from the Red List of the Khabarovsk krai. The peculiarities of field aquatic flora studies in the Amur River basin which require preliminary work with the program are analyzed. The reliability of their application to geobotanical studies is assessed. The features of the program, specific examples of its application to the complex field studies for various subjects (selection of objects, determination of trajectories, measurement tactics, etc.), and the results of such studies are described. The examples of using archival images of the program for the identification of growth dynamics for some vegetation species and the general methods for conducting such studies are given.*

УДК 504.3.054&lt;&lt;2018.05&gt;&gt;(047)(47+57)

## О загрязнении природной среды и радиационной обстановке на территории Российской Федерации в мае 2018 г.\*

Е. С. Дмитриевская, Т. А. Красильникова, О. А. Маркова

Описание критериев экстремально высокого (ЭВЗ) и высокого загрязнения (ВЗ) атмосферного воздуха, водных объектов, а также других критериев загрязнения природной среды приведено в журнале “Метеороло-

гия и гидрология”, 2018, № 1, с. 121—130. Показатели загрязнения воды приводятся по предельно допустимой концентрации (ПДК) для воды рыбохозяйственных водных объектов.

### Загрязнение природной среды в результате аварий

**Атмосферный воздух.** В мае 2018 г. сведений об авариях, вызвавших загрязнение атмосферного воздуха в населенных пунктах, не поступало. Стационарной сетью повышенных уровней загрязнения атмосферного воздуха, обусловленных аварийными ситуациями, зарегистрировано не было.

**Водные объекты.** 21 мая в р. Чапаевка (приток Волги) в 1 км ниже г. Чапаевск (Самарская область) было зарегистрировано высокое загрязнение речной воды хлорорганическими пестицидами (альфа-гексохлорциклогексан, 4 ПДК). По данным Приволжского УГМС, загрязнение было обусловлено вымыванием высокотоксичных примесей из донных отложений, а также их фильтрацией с грунтовыми водами из почвы и шламонакопителей.

В связи с поступившей 25 мая информацией о массовой гибели рыбы в р. Исеть (приток Тобола) в черте п. Большой Исток (Сысертский район Свердловской области) специалистами Уральского УГМС было проведено визуальное обследование и осуществлен отбор проб речной воды для последующего химического анализа в двух контрольных створах: в 7 км ниже г. Екатеринбург, в черте п. Большой Исток и в 19 км ниже г. Екатеринбург, в черте п. Мельзавод № 4. В ходе визуального обследования в районе 1-го контрольного створа было зафиксировано незначительное количество мертвой рыбы, вода была мутной, от нее исходил

затхлый запах. По результатам химического анализа было установлено превышение норматива ПДК в обоих контрольных створах по летучим фенолам (соответственно 9 и 14 ПДК), нефтепродуктам (8 и 11 ПДК) и фосфатам (по 7 ПДК). Кроме того, в 1-м створе отмечалось превышение норматива ПДК также по азоту нитритному (7 ПДК), азоту аммонийному (5 ПДК) и содержанию трудноокисляемых органических веществ по ХПК (4 ПДК). Случаев высокого и экстремально высокого загрязнения зарегистрировано не было.

**Почвы.** В связи с поступившей в Уральское УГМС 11 мая информацией о произошедшем 6 апреля вследствие несанкционированной врезки в принадлежащий ПАО “Транснефть” нефтепровод Сургут — Нижний Новгород — Полоцк разливе нефти на почву в районе г. Верхотурье (Свердловская область) 14 мая специалистами Уральского УГМС было проведено визуальное обследование, а также осуществлен отбор проб воды в ближайших к месту аварии водных объектах: р. Тура (приток Тобола, пробы отбирались в 11,3 км ниже г. Верхотурье, в 2,8 км ниже места впадения р. Черная) и р. Черная (приток Туры, пробы отбирались в 8,6 км восточнее г. Верхотурье, в 2,05 км выше устья). По результатам химического анализа, содержание нефтепродуктов в отобранных в обеих реках пробах воды не превышало норматива ПДК. По данным Депар-

\* Официальная информация Росгидромета.

таменга Росприроднадзора по Уральскому федеральному округу, площадь земельного участка, подвергнутого нефтяному загрязнению, составляет 2755 м<sup>2</sup>. Объем разлившейся на почву нефти, по предварительной

оценке, превышает 10 т. Прокуратурой Свердловской области проводится проверка по факту загрязнения нефтепродуктами почвы и воды водных объектов в районе г. Верхотурье.

### Экстремально высокое загрязнение природной среды

**Атмосферный воздух.** В мае 2018 г. случаев экстремально высокого загрязнения атмосферного воздуха не было зарегистрировано (в мае 2017 г. — также не зарегистрировано).

**Водные объекты.** В мае 2018 г. на территории Российской Федерации случаи ЭВЗ поверхностных вод веществами 1-го и 2-го классов опасности наблюдательной сетью Росгидромета были зарегистрированы 8 раз на 6 водных объектах (в мае 2017 г. — 6 раз на 4 водных объектах).

Случаи ЭВЗ поверхностных вод веществами 3-го и 4-го классов опасности были отмечены наблюдательной сетью Росгидро-

мета 53 раза на 30 водных объектах (в мае 2017 г. — 61 раз на 34 водных объектах).

Таким образом, всего в мае 2018 г. случаи ЭВЗ поверхностных вод загрязняющими веществами 1—4-го классов опасности были зафиксированы наблюдательной сетью Росгидромета 61 раз на 34 водных объектах (в мае 2017 г. — 67 раз на 34 водных объектах). Перечень случаев ЭВЗ представлен в табл. 1. Основные источники загрязнения — предприятия металлургической, горнодобывающей, нефтяной и целлюлозно-бумажной промышленности, а также жилищно-коммунального хозяйства.

### Высокое загрязнение природной среды

**Атмосферный воздух.** В мае 2018 г. случаи высокого загрязнения атмосферного воздуха вредными примесями в населенных пунктах не регистрировались (в мае 2017 г. — также не отмечалось). В дополнение к ранее представленной информации о зарегистрированных случаях высокого загрязнения природной среды на территории России в апреле 2018 г. (см. журнал “Метеорология и гидрология”, 2018, № 7, с. 125) сообщаем, что случай высокого загрязнения воздуха веществом 1-го класса опасности — бенз(а)пиреном — был зарегистрирован в г. Новокузнецк (Кемеровская область; 12,1 ПДК).

**Водные объекты.** В мае 2018 г. на территории Российской Федерации было зарегистрировано 238 случаев высокого загрязнения на 104 водных объектах (в мае 2017 г. — 270 случаев ВЗ на 121 водном объекте). Перечень случаев высокого загрязнения водных объектов приведен в табл. 2.

Высокое загрязнение отмечалось в течение месяца в бассейнах крупнейших рек страны: Волги (31% общего числа зарегистрированных случаев ВЗ), Тобола (19%), Камы (18%), Оби (8%), Амура (7%), Урала (4%), Северной Двины и Ангары (по 2%), Печоры, Енисея, Терека, Днепра и Дона — по 1%. На более мелких реках, озерах, а также на водохранилищах было отмечено 4% всех случаев ВЗ.

Распределение случаев высокого загрязнения по ингредиентам следующее: взвешенные вещества — 144, азот нитритный — 19, ионы цинка — 15, кислород — 9, легкоокисляемые органические вещества по БПК<sub>5</sub> и ионы марганца — по 7, ионы меди — 6, ионы никеля и азот аммонийный — по 5, ионы алюминия и железа общего — по 4, гексахлорциклопексан (ГХЦГ) и ионы ртути — по 3, лигносульфонаты, водородный показатель рН — по 2, нефтепродукты, дитиофосфат крезиловый, фосфаты и лигнин — по 1.

### Москва

В мае 2018 г., по данным государственной наблюдательной сети (см. схему расположения станций и сведения о них в журнале “Метеорология и гидрология”, 2018, № 1, с. 128, 129), в целом по городу отмечался повышенный уровень загрязнения атмосферного воздуха, который определялся показа-

телями качества воздуха СИ = 2 и НП = 7%. Повышенный уровень загрязнения воздуха города определяли концентрации диоксида азота, аммиака и формальдегида.

Наибольшие значения показателей загрязнения атмосферного воздуха отмечались в следующих административных окру-

Таблица 1

## Случаи экстремально высокого загрязнения поверхностных вод суши в мае 2018 г.

Водный объект, пункт	Ингредиент	Концентрация, ПДК
Вещества 1-го класса опасности		
р. Пышма, г. Березовский (Свердловская область)	Ионы мышьяка (2 случая)	7, 11
Вещества 2-го класса опасности		
оз. Большой Вудъявр, г. Кировск (Мурманская область)	Ионы молибдена	22
оз. Имандра, г. Апатиты, у о. Избяной (Мурманская область)	То же	12
р. Айва, г. Красноуральск (Свердловская область)	Ионы свинца	8
22,9 км выше устья	То же	7
18,6 км выше устья	Ионы молибдена	10
р. Белая, г. Апатиты (Мурманская область)	То же	5
р. Волга, с. Верхнелебяжье (Астраханская область)	То же	5
Вещества 3-го класса опасности		
р. Амгунь, с. им. П. Осипенко (Хабаровский край)	Ионы цинка	52
р. Блява, г. Медногорск (Оренбургская область)	То же	76
р. Левая Силинка, п. г. т. Горный (Хабаровский край)	Ионы меди	57
р. Нимелен, с. Тимченко (Хабаровский край)	Ионы цинка	78
р. Холдоми, п. г. т. Солнечный (Хабаровский край)	Ионы меди (2 случая)	50, 77
Вещества 4-го класса опасности		
р. Дачная, г. Арсеньев (Приморский край)	Легкоокисляемые органические вещества по БПК <sub>5</sub>	28
р. Ельцовка-2, г. Новосибирск (Новосибирская область)	Ионы марганца	52
р. Исеть (Свердловская область) г. Екатеринбург	Взвешенные вещества (3 случая)	69—187
г. Каменск-Уральский	То же (2 случая)	53, 139
д. Колюткино	>>	219
р. Камышенка, г. Новосибирск (Новосибирская область)	Ионы марганца	53
р. Лозья, г. Першино (Свердловская область)	Взвешенные вещества	53
р. Нейва, г. Невьянск (Свердловская область)	То же	61
р. Нимелен, с. Тимченко (Хабаровский край)	Ионы марганца	97
р. Ныда, п. Ныда (Ямало-Ненецкий автономный округ)	То же	63
р. Обь, г. Новосибирск (Новосибирская область)	>>	51
р. Обь (Ямало-Ненецкий автономный округ)	Ионы алюминия (2 случая)	52, 79
п. Горки протока Малая Обь, с. Мужы	Ионы марганца	65
р. Плющиа, г. Новосибирск (Новосибирская область)	То же	63
	>>	62

Продолжение табл. 1

Водный объект, пункт	Ингредиент	Концентрация, ПДК
р. Пим,	>>	70
г. Лянтор (Ханты-Мансийский автономный округ)		
р. Полуи,	Кислород	1,6; 1,7*
г. Салехард (Ямало-Ненецкий автономный округ)	(2 случая)	
	Ионы марганца	53
р. Правая Хетга,	То же (2 случая)	97, 104
п. г. т. Пангоды (Ямало-Ненецкий автономный округ)		
р. Пур	>>	63
п. Самбург (Ямало-Ненецкий автономный округ)		
п. Уренгой	>>	77
р. Пышма,	Взвешенные вещества	55
г. Березовский (Свердловская область)		
р. Пяку-Пур,	Ионы марганца	83
г. Тарко-Сале (Ямало-Ненецкий автономный округ)		
р. Северушка,		
г. Полевской (Свердловская область)		
1,5 км выше устья	То же	86
3,4 км выше устья	>>	119
р. Северная Сосьва,	>> (2 случая)	69, 75
п. Березово (Ханты-Мансийский автономный округ)		
р. Сива,	Взвешенные вещества	50—139
д. Гавриловка (Удмуртская Республика)	(3 случая)	
р. Тавда,	Ионы марганца	57—68
г. Тавда (Свердловская область)	(3 случая)	
р. Тагил,	Взвешенные вещества	63
г. Нижний Тагил (Свердловская область)		
р. Таз,	Ионы марганца	61
п. Тазовский (Ямало-Ненецкий автономный округ)		
Тазовская губа,	То же (2 случая)	69, 128
г. Находка (Ямало-Ненецкий автономный округ)		
р. Тула	Ионы марганца	68
г. Новосибирск (Новосибирская область)		
р. Тура	Взвешенные вещества	65
г. Верхотурье (Свердловская область)		
г. Нижняя Тура	То же	64
р. Чусовая,	>>	67
р. п. Староуткинский (Свердловская область)		

*Примечание.* \* Концентрация приведена в миллиграммах на литр; экстремально высокое загрязнение соответствует содержанию в воде растворенного кислорода 2 мг/л и менее.

гах Москвы: СИ = 1, НП = 1—7% диоксида азота — в Центральном (район Мещанский), Южном (район Нагорный) и Восточном (район Богородское); СИ = 1—2, НП = 1—6% формальдегида — в Южном (район Нагорный), Юго-Восточном (район Печатники), Северном (район Дмитровский), Восточном (район Богородское) и Западном (район Можайский) округах; СИ = 2, НП = 1% аммиака — в Северо-Западном округе (район Южное Тушино).

Максимальные разовые концентрации отмечались в следующих районах: формальдегида (1,9 ПДК<sub>м.р.</sub>) — ночью 17 мая в районе Печатники Юго-Восточного округа, аммиака

(1,6 ПДК<sub>м.р.</sub>) — утром 14 мая в районе Южное Тушино Северо-Западного округа, диоксида азота (1,4 ПДК<sub>м.р.</sub>) — днем 14 мая и ночью 29 мая в районе Нагорный Южного округа.

В мае 2018 г. в целом по городу среднемесячная концентрация формальдегида составляла 0,021 мг/м<sup>3</sup> (2,1 ПДК<sub>с.с.</sub>), а максимальная разовая концентрация достигала 0,096 мг/м<sup>3</sup> (1,9 ПДК<sub>м.р.</sub>). По оценкам состояния загрязнения атмосферного воздуха с учетом прежних ПДК (см. журнал “Метеорология и гидрология”, 2018, № 1, с. 129), средняя за май концентрация формальдегида составила 7,0 ПДК<sub>с.с.</sub>, а максимальная разовая концентрация — 2,7 ПДК<sub>м.р.</sub>, НП = 33%.

Таблица 2

## Случаи высокого загрязнения водных объектов в мае 2018 г.

Территория	Ингредиент	Класс опасности	Число случаев	Концентрация, ПДК	
				минимум	максимум
Бассейн р. Амур					
Забайкальский край	Азот нитритный	4	1		18
	Фосфаты	4	1		21
Хабаровский край	Азот аммонийный	4	1		13
	Ионы меди	3	3	30	37
	Ионы цинка	3	9	12	38
Бассейн р. Ангара					
Иркутская область	Взвешенные вещества	4	5	12	49
	Лигнин	3	1		13
Бассейн р. Волга					
Астраханская область	Ионы ртути	1	1		3
Кировская область	Азот аммонийный	4	1		16
	Азот нитритный	4	1		19
	Взвешенные вещества	4	12	10	21
	Кислород	4	2	2,6*	2,9*
Московская область	Азот аммонийный	4	3	12	17
	Азот нитритный	4	13	11	49
	Легкоокисляемые органические вещества по БПК <sub>5</sub>	4	6	6	10
	Ионы железа общего	4	1		35
Нижегородская область	Взвешенные вещества	4	29	10	40
Республика Марий Эл	То же	4	2	13	13
Республика Татарстан	Азот нитритный	4	1		11
Самарская область	Гексахлорциклогексан (ГХЦГ)	1	2	4	4
Удмуртская Республика	Взвешенные вещества	4	1		14
Бассейн р. Днепр					
Смоленская область	Кислород	4	1		2,1*
Бассейн р. Дон					
Белгородская область	Азот нитритный	4	1		12
Бассейн р. Енисей					
Иркутская область	Взвешенные вещества	4	1		16
Бассейн р. Кама					
Кировская область	Взвешенные вещества	4	3	11	18
Пермский край	То же	4	22	11	25
Свердловская область	Водородный показатель рН	4	1		9,7**
	Взвешенные вещества	4	2	11	19
Удмуртская Республика	То же	4	8	13	43
Челябинская область	>>	4	9	11	19
Бассейн р. Обь					
Кемеровская область	Ионы цинка	3	1		20
Новосибирская область	Ионы алюминия	4	3	25	42
	Ионы марганца	4	3	36	46
Свердловская область	Взвешенные вещества	4	1		37
Ханты-Мансийский автономный округ	Кислород	4	2	2,2*	2,3*

Продолжение табл. 2

Территория	Ингредиент	Класс опасности	Число случаев	Концентрация, ПДК	
				минимум	максимум
Ямало-Ненецкий автономный округ	Гексахлорциклогексан (ГХЦГ)	1	1		3
	Ионы железа общего	4	3	30	47
	Кислород	4	2	2,0*	2,1*
	Ионы марганца	4	2	45	48
	Ионы цинка	3	1		14
Республика Коми	Бассейн р. Печора				
	Ионы алюминия	4	1		13
Вологодская область	Бассейн р. Северная Двина				
	Кислород	4	2		2,2*
Кировская область	Лигносульфонаты	3	2	11	11
	Взвешенные вещества	4	2	12	15
Республика Северная Осетия — Алания	Бассейн р. Терек				
	Легкоокисляемые органические вещества по БПК <sub>5</sub>	4	1		6
Курганская область	Бассейн р. Тобол				
	Водородный показатель рН	4	1		9,7**
Свердловская область	Взвешенные вещества	4	7	13	36
	То же	4	25	11	44
	Ионы марганца	4	1		40
	Ионы никеля	3	1		25
Челябинская область	Ионы цинка	3	3	11	20
	Взвешенные вещества	4	7	11	20
	Ионы цинка	3	1		25
Оренбургская область	Бассейн р. Урал				
	Азот нитритный	4	2	10	11
Челябинская область	Ионы меди	3	1		48
	Взвешенные вещества	4	7	11	16
г. Санкт-Петербург	Малые реки, озера, водохранилища				
Мурманская область	Ионы марганца	4	1		31
	Дитиофосфат крезильовый	4	1		10
	Ионы меди	3	1		48
	Ионы никеля	3	4	11	37
	Ионы ртути	1	2	3	3
Сахалинская область	Нефтепродукты	3	1		33
Челябинская область	Взвешенные вещества	4	1		11

*Примечание.* \*Концентрация дана в миллиграммах на литр, высокое загрязнение соответствует содержанию в воде растворенного кислорода от 3 до 2 мг/л; \*\* по показателю рН критерием ВЗ являются значения от 4 до менее 5 и более 9,5 до 9,7 включительно.

Таким образом, уровень загрязнения атмосферного воздуха формальдегидом с учетом прежних ПДК оценивается как высокий.

В целом по городу среднемесячная концентрация диоксида азота составляла 1,7 ПДК<sub>сс</sub>.

### Радиационная обстановка

Радиационная обстановка на территории Российской Федерации в мае 2018 г. в целом была стабильной и находилась в пределах естественного и техногенно измененного радиационного фона. Концентрации радиоактив-

ных веществ антропогенного происхождения в природной среде находились в пределах многолетнего фона, сформированного в результате глобальных выпадений и аварийных ситуаций на Чернобыльской АЭС и ФГУП ПО "Маяк",

и были на 2—5 порядков ниже установленных допустимых уровней в соответствии с гигиеническими требованиями.

Случаи регистрации повышенной суммарной плотности радиоактивных выпадений из воздуха, обусловленные естественными процессами, отмечались однократно в г. Красноярск 14—15 мая.

Случаи регистрации повышенной суммарной объемной радиоактивности призем-

e-mail: umz\_voda2002@mail.ru

ного воздуха, обусловленные естественными процессами, в мае 2018 г. не отмечались.

По данным ежедневных измерений, в 100-километровых зонах расположения АЭС и других радиационно опасных объектов значения мощности экспозиционной дозы гамма-излучения на местности (МЭД) находились в пределах от 5 до 23 мкР/ч, что соответствует уровням естественного радиационного фона.

Поступила в редакцию 19 VI 2018 г.

УДК 551.506.2<<2018.05>>(047)(47+57)

## Погода на территории Российской Федерации в мае 2018 г.

Л. Н. Паршина

Погода в мае 2018 г. была переменчивой: летнее тепло сменялось непродолжительными похолоданиями, местами с ночными заморозками. В целом последний месяц календарной весны на европейской части России был необычно теплым (кроме крайних восточных районов), почти повсюду отмечались рекорды максимальной температуры (новые абсолютные значения минимальной и максимальной температуры воздуха в мае 2018 г. на территории России приведены на сайте журнала [www.mig-journal.ru](http://www.mig-journal.ru)). Средняя месячная температура воздуха (по данным ВНИИГМИ-МЦД) на большей части территории была на 2—4°C выше средних многолетних значений (рис. 1). В первой декаде в Центральном федеральном округе, в течение месяца в Приволжском, Южном и Северо-Кавказском федеральных округах, в том числе в Крыму, были превышены прежние максимальные значения температуры (см. сайт [www.mig-journal.ru](http://www.mig-journal.ru)). Во то же время на востоке Европейской России температура воздуха была близка к норме и на 0,5—1,2°C ниже нее. В отдельные ночи в Северо-Кавказском федеральном округе и Волгоградской области зафиксированы абсолютные минимальные значения температуры (см. сайт [www.mig-journal.ru](http://www.mig-journal.ru)), в Башкортостане отмечались слабые заморозки.

Холоднее, чем обычно, оказался май 2018 г. на юге Уральского федерального округа, в Западной Сибири, в центральных и южных районах Красноярского края и в

Хакасии, аномалия средней месячной температуры воздуха составила –1,5...–4,0°C. На юге Уральского федерального округа в конце второй декады в отдельные дни отмечены абсолютные минимальные значения температуры. На севере, местами на юге Уральского федерального округа в среднем за месяц температура была близка к средним многолетним значениям, в Ямало-Ненецком автономном округе — на 1,3°C ниже нормы, в Челябинской области — на 1,2°C ниже нее. В Иркутской области в начале второй декады, во второй половине второй декады в Омской области, в середине третьей декады в Хакасии местами были установлены новые абсолютные минимальные значения температуры, несмотря на то что, например, в Иркутской области средняя месячная температура была в пределах нормы.

На юге Дальнего Востока, на юге и в центре Якутии май 2018 г. выдался аномально теплым. Средняя месячная температура на 2—3°C превысила многолетние значения. В первой декаде во многих районах Якутии, в том числе на севере, а также в Иркутской области и на юге Камчатского края, во второй декаде на юге Приморского края, в третьей декаде в Иркутской области, Бурятии, Амурской области, в Забайкальском, Хабаровском, Камчатском краях, Тыве и в Якутии были перекрыты абсолютные максимальные значения температуры.

В большинстве районов европейской территории России в мае 2018 г. выпало неболь-

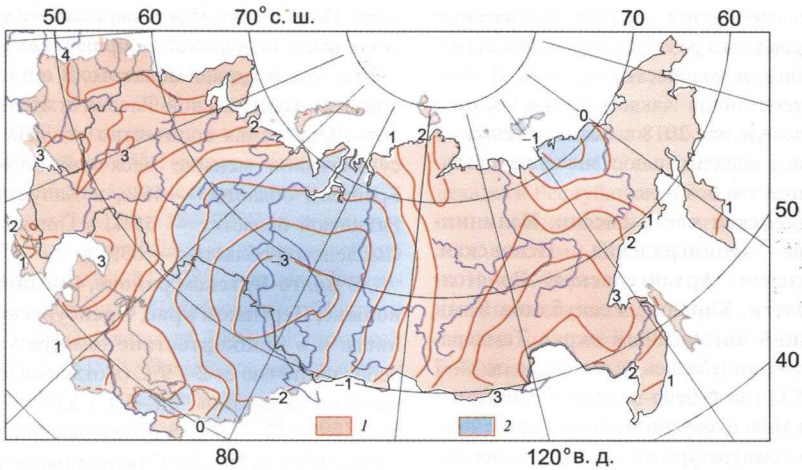


Рис. 1. Аномалия средней месячной температуры воздуха в мае 2018 г.

1)  $\Delta T \geq 0^\circ\text{C}$ ; 2)  $\Delta T < 0^\circ\text{C}$ .

пное количество осадков. Их дефицит отмечался на юго-западе и востоке Центрального федерального округа, на преобладающей части Северо-Западного федерального округа (кроме южных районов Республики Коми), Приволжского федерального округа (кроме Пермского края, Татарстана, Башкортостана, Удмуртии, Оренбургской области), Южного и Северо-Кавказского федеральных округов (кроме Крыма, западной половины Ростовской области и Краснодарского края, Адыгеи, Северной Осетии, Ингушетии, Карачаево-Черкесии, отдельных районов Дагестана и Чеченской Республики) (рис. 2, см. также

данные на сайте [www.mig-journal.ru](http://www.mig-journal.ru)). В то же время на юге Республики Коми и в Пермском крае осадков выпало соответственно 104 и 113% нормы. Меньше нормы в 4 раза было осадков в Чукотском автономном округе, на остальной территории Дальнего Востока они выпадали неравномерно. Так, в Амурской области, Хабаровском крае, Еврейской автономной области и Камчатском крае осадков было мало, на остальной территории — около и больше нормы. В Сибири сумма осадков за месяц оказалась в пределах нормы и больше нее, причем в Алтайском крае, в Новосибирской и Омской областях

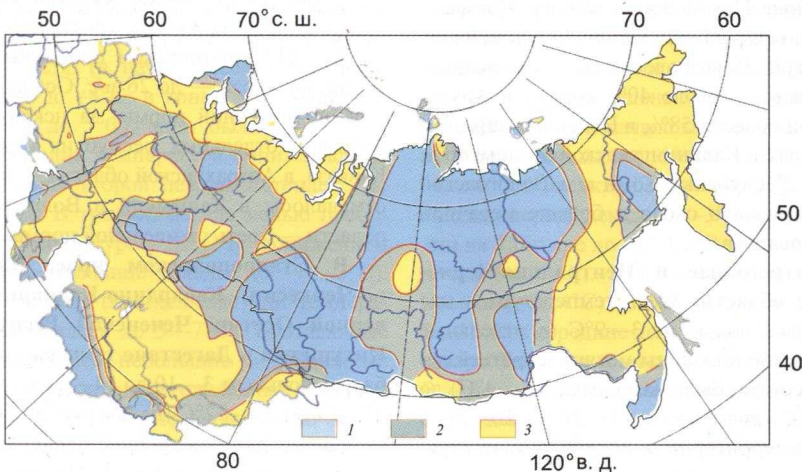


Рис. 2. Аномалия месячного количества осадков в мае 2018 г.

1 — месячное количество осадков больше нормы ( $>120\%$ ); 2 — около нормы ( $80-120\%$ ); 3 — меньше нормы ( $<80\%$ ).

выпало около 2 норм осадков. В Тюмени в первой декаде два раза был превышен суточный максимум количества осадков. В Абакане (метеостанция Хакасская) и в Омске в третьей декаде мая 2018 г. также отмечалось абсолютное максимальное значение суточного количества осадков.

**Европейская часть России. Калининградская, Ленинградская, Псковская, Новгородская, Архангельская, Вологодская области, Карелия, Республика Коми и Ненецкий автономный округ.** Температура воздуха колебалась в мае ночью от 1—7 до 9—15°C (на северо-востоке Республики Коми и в Ненецком автономном округе преобладала температура от -3...-8°C, в первой пятидневке месяца на крайнем северо-востоке Республики Коми отмечалось понижение до -16...-20°C; в Мурманской области первая пятидневка месяца была с заморозками до -1...-3°C, слабые заморозки в дальнейшем отмечались в отдельные дни), днем было от 2—9°C (на северо-востоке территории местами от -5°C, в начале месяца на крайнем северо-востоке Республики Коми от -11°C) до 17—24°C (в середине месяца в Ленинградской, Новгородской областях, в середине и в конце месяца в Псковской области до 28—29°C, в середине месяца в Вологодской области до 26°C, в Карелии до 25°C, в конце месяца в Калининградской области до 30°C). Отмечался дождь (на севере Архангельской области, Республики Коми, в Ненецком автономном округе с мокрым снегом), местами сильный (15—25 мм осадков), на побережье и в районе Новой Земли (Малые Кармакулы) был ветер 21—29 м/с. В Ленинградской, Псковской, Новгородской областях осадков было мало — около 40% нормы, в Архангельской области 58%, в Ненецком автономном округе и Калининградской области 66%. На юге Республики Коми и в Вологодской области выпало около и больше месячной нормы осадков.

**Центральные и Центрально-Черноземные области.** Здесь температура в мае колебалась ночью от 3—9°C (в отдельные ночи первой половины месяца и третьей декады местами были заморозки -2...-4°C) до 11—17°C, днем — от 12—19 до 22—29°C (на юге территории в первой декаде стояла аномально жаркая погода, было до 30—31°C). В отдельные дни отмечались дождь, местами сильный (15—37 мм), гроза, град, ветер 18—23 м/с. В пределах месячной нормы осадков (80—90%) выпало в Ярослав-

ской, Ивановской, Владимирской, Тульской, Липецкой, Тамбовской, Воронежской, Курской и Белгородской областях. В остальных областях Центральной России и Центрального Черноземья количество осадков было существенно меньше месячной нормы: в Брянской области — 46%, в Калужской и Рязанской областях — 55%, в Орловской и Смоленской областях — 65%.

**В Волго-Вятском районе, Среднем Поволжье, Пермском крае, Оренбургской области и в Башкортостане** температура колебалась ночью от 2—9°C (в отдельные ночи местами заморозки -1...-6°C) до 11—18°C, днем — от 12—18°C (в отдельные дни на севере от 6°C) до 20—26°C (в отдельные дни на юге 27—32°C). В отдельные дни отмечались дождь, местами сильный, ливневый дождь, на юге территории гроза, ветер 19—24 м/с, в конце месяца местами до 29 м/с. Мало осадков выпало в Мордовии — треть месячной нормы, в Нижегородской и Пензенской областях — 50% среднего количества осадков, в Чувашии, Марий Эл и Саратовской области — около 60%, в Кировской, Ульяновской и Самарской областях — около 70% нормы. На остальной территории осадков выпало в пределах обычных значений.

**В Астраханской, Волгоградской, Ростовской областях, Калмыкии, Краснодарском крае (в том числе в Адыгее), Крыму** температура колебалась ночью от 4—11 до 14—21°C, днем от 17—24 до 25—32°C (на востоке 33—37°C). В отдельные дни отмечались дождь, местами сильный (более 15 мм за сутки), гроза, ветер 13—18 м/с, на Черноморском побережье Краснодарского края — до 26 м/с. Осадков было меньше месячной нормы, за исключением Крыма и отдельных республик Северного Кавказа, в Астраханской области — в мае не отмечалось; в Калмыкии и Волгоградской области — треть от месячной нормы.

**В Ставропольском крае, Карачаево-Черкесии, Кабардино-Балкарии, Северной Осетии, Чеченской Республике, Ингушетии и Дагестане** температура колебалась ночью от 3—10 до 14—21°C, днем от 17—24 до 25—32°C (на востоке до 36°C). В отдельные дни отмечались дождь, местами сильный, гроза и ветер 13—18 м/с. Около нормы осадков (80—97%) выпало в Карачаево-Черкесии, Ингушетии и Северной Осетии, а также местами в остальных республиках Северного Кавказа.

**Азиатская часть России. В Свердловской, Челябинской, Курганской областях и на юге Тюменской области** температура воздуха в мае 2018 г. колебалась ночью от 0—7°C (в отдельные ночи заморозки до -1...-4°C) до 8—15°C (в конце месяца температура повышалась местами до 16—18°C), днем — от 7—12 до 15—22°C (в отдельные дни в конце второй декады и в третьей декаде местами до 24—28°C, на юге Тюменской области и в Челябинской области в конце второй декады до 30°C, в Курганской области до 31°C). Отмечался небольшой и умеренный дождь, ветер до 16—21 м/с (в Свердловской, Курганской и Челябинской областях до 24 м/с). Осадков выпало за месяц около и больше месячной нормы: в Челябинской области 97%, в Курганской области 163%, на юге Тюменской области 138%, в Свердловской области 118%, лишь в Екатеринбургe 42% нормы.

**В Ямало-Ненецком автономном округе** в первой декаде мая ночью было -7...-14°C (в отдельные ночи -16...-17°C, в середине декады местами температура повышалась до -4°C, днем было -1...-5°C, в отдельные дни местами до -8°C; в дальнейшем преобладала температура ночью -6...1°C (в отдельные ночи в первой половине месяца местами до -9°C), днем 0...7°C (в отдельные дни до -1...-3°C). Осадки были во второй и третьей декадах месяца в виде снега, мокрого снега, дождя, отмечались гололедные явления и ветер до 22 м/с. За месяц осадков выпало в пределах и меньше месячной нормы.

**В Ханты-Мансийском автономном округе** в первой и второй декадах ночью было -5...2°C (в начале месяца в отдельные ночи до -8°C, в конце второй декады потеплело до 5°C), днем было 5—12°C (в отдельные дни температура понижалась до 1°C, в конце второй декады потеплело до 18—23°C). В третьей декаде ночью преобладала температура 0...7°C (с понижением во второй половине декады до -1...-3°C), днем 10—15°C (в отдельные дни температура понижалась до 5—7°C). В отдельные дни отмечались небольшие и умеренные осадки (снег, дождь), гололедные явления, ветер до 18—21 м/с. Осадков выпало около, на юго-востоке — больше месячной нормы, лишь в Ханты-Мансийске количество осадков составило 35% месячной нормы.

**На юге Западной Сибири, в центральных и южных районах Красноярского края, в Иркутской области и Забайкалье**

температура воздуха в мае 2018 г. колебалась ночью от -2...5°C (в отдельные ночи первой декады в Томской области, Бурятии и Забайкальском крае от -3...-10°C, на севере Иркутской области и Забайкалья местами от -15°C) до 7—14°C (в отдельные дни третьей декады в Республике Алтай, в Омской области, в конце месяца в Бурятии местами 15—16°C, местами до 19°C), днем — от 5—12°C (в Новосибирской области в конце второй декады местами было 3—4°C, в Томской области в конце первой декады 2—3°C, во второй декаде до -1°C, в Кемеровской области во второй половине первой и второй декад до 2°C, в Алтайском крае в конце второй декады 2°C, в центральных районах Красноярского края во второй половине первой и второй декад 3—4°C, в Иркутской области в конце первой декады 2—4°C) до 18—25°C (в третьей декаде местами в Республике Алтай до 32°C, в Хакасии, Тыве, Бурятии до 33°C, в Иркутской области до 30°C, в конце месяца в Забайкальском крае до 35°C). В Западной Сибири (кроме Омской области), местами в Восточной Сибири (кроме Хакасии, Тывы, Иркутской области, Бурятии и Забайкальского края) от 16 до 22 дней месяца наблюдались осадки (мокрый снег, дождь), местами сильные, в отдельные дни грозы, ветер 19—24 м/с, местами до 28 м/с. В Новосибирской, Кемеровской областях и Алтайском крае выпало около 2 месячных норм осадков.

**В Таймырском Долгано-Ненецком, Эвенкийском и Туруханском муниципальных районах Красноярского края** в первой и второй декадах мая температура была ночью -8...-15°C (в начале месяца на Таймыре местами было -17...-21°C; в Эвенкии -1...-8°C, в отдельные ночи первой декады -12...-14°C, в начале месяца и в середине второй декады тепло до 1—4°C), днем -1...-6°C, в Эвенкии было 4—11°C, в отдельные дни первой декады до -3°C (в отдельные дни на Таймыре до -13°C). В третьей декаде ночью было -3...-10°C (на юге Таймыра и в Эвенкии -2...4°C), днем -3...1°C, в Эвенкии 8—15°C, в середине декады до 18—20°C (на севере Таймыра в начале декады до -8°C). В отдельные дни отмечались снег, мокрый снег, дождь, ветер до 18—23 м/с. Осадков выпало около и больше месячной нормы (около 100%), в Туре — 70% нормы.

**В Амурской области, Хабаровском, Приморском краях, на Сахалине, Курильских островах и юге Камчатского края** температура колебалась ночью от -2...5 до

3—10°C (в отдельные ночи третьей декады в Амурской области до 12—15°C, во второй декаде в Хабаровском крае до 12°C, в начале второй декады в Приморском крае до 14°C), днем — от 5—12°C (в начале месяца в Приморском крае, на Сахалине, Курильских о-вах и юге Камчатского края 3—5°C) до 18—25°C (в отдельные дни второй и третьей декад в Амурской области местами 30—32°C). Дождь шел редко, местами сильный, ветер достигал 19—24 м/с, на юге Камчатского края — 32 м/с, 14 мая на Сахалине зафиксирован сильный туман (видимость до 50 м). В Амурской области, Хабаровском крае и Еврейской автономной области осадков выпало около 60% месячной нормы, в Камчатском крае 76%, на Сахалине 90%, в Приморском крае 124%.

**В Чукотском автономном округе, Магаданской области, Якутии и на севере Камчатского края** температура в мае колебалась ночью от –3...–10°C (в первой декаде на востоке Якутии, в первой и второй декадах на арктическом побережье Якутии и Чукотского автономного округа было –15...–18°C) до –1...6°C (местами в южных и центральных районах Якутии до 12°C), днем от 3—9°C (на островах и арктическом побережье от –8...–11°C) до 13—20°C (в первой и третьей декадах местами в Якутии 25—30°C). Местами отмечались снег, мокрый снег, дождь, в отдельные дни были сильные осадки и ветер 13—18 м/с. 25% нормы осадков выпало в Чукотском автономном округе, 70% — на востоке Якутии, 116% — на большей части Магаданской области.

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации; e-mail: lop1@mecom.ru

Поступила в редакцию  
17 VII 2018 г.

УДК 551.506.2<<2018.05>>(047)(47+57)

## Аномальные гидрометеорологические явления на территории Российской Федерации в мае 2018 г.

Т. В. Бережная, А. Д. Голубев, Л. Н. Паршина

### Особенности атмосферной циркуляции Северного полушария

В верхней стратосфере (изобарическая поверхность 10 гПа) к 7 мая 2018 г. завершилась перестройка стратосферной циркуляции на летний режим. Следует отметить, что произошло это значительно позднее средних сроков, которые приходятся на середину апреля. Сформировавшийся антициклон быстро усиливался, но, тем не менее, оставался в течение месяца ослабленным по сравнению с нормой. В среднем за месяц геопотенциал в его центре оказался на 20 дам меньше обычных значений.

В экваториальной стратосфере в мае 2018 г. произошло усиление восточной фазы ветров квазидвухлетнего цикла.

В средней тропосфере (изобарическая поверхность 500 гПа) в осредненном за месяц поле геопотенциала положение ложбин и гребней было близко к климатическому, но те и другие в основном были интенсивнее,

чем обычно. Центры околполярного вихря занимали свойственное им положение, но были очень глубоки, особенно обширнейший канадский центр. Аномалии геопотенциала  $H_{500}$  в нем в среднем за месяц составили –11 дам вблизи центра и –18 дам над югом Гренландии. Под влиянием этого огромного тропосферного циклона практически постоянно в течение месяца находились северо-восток Канады и почти весь север Атлантики. В первой и третьей декадах мая 2018 г. североатлантические ложбины часто распространялись на юго-восток, охватывая своим влиянием Западную, Центральную Европу и запад Средиземноморья. В связи с этим аномалии геопотенциала (до –4 дам) сформировались на юге Пиренейского п-ова и на северо-западе Африки. В таймырском климатическом центре аномалия геопотенциала  $H_{500}$  составила в среднем за месяц –5 дам.

В связанной с ним тропосферной ложбине, занимавшей Урал и Западную Сибирь, аномалии достигли  $-9$  дам. Довольно глубокая ложбина с самостоятельным циклоническим центром соответствовала алеутскому минимуму: аномалия геопотенциала на западе Аляски составила  $-5$  дам.

Но преобладали в средней тропосфере все-таки положительные аномалии геопотенциала. Самые большие из них отмечались в субтропической зоне Атлантики и в северной половине Европы, где в течение всего месяца господствовали тропосферные гребни и антициклоны. Аномалии геопотенциала над Атлантикой в среднем за месяц составили  $8-10$  дам. На юге Скандинавии и на севере Европы антициклоны, часто формировавшиеся во второй и третьей декадах мая, стали причиной аномалий геопотенциала от  $12$  до  $18$  дам. Часто в течение месяца, вопреки обыкновению, интенсивные гребни отмечались над Восточной Сибирью и Дальним Востоком России. Во второй декаде мая над Камчаткой даже существовал самостоятельный антициклон. В итоге в среднем за месяц геопотенциал в этих районах оказался больше нормы на  $2-9$  дам. Довольно интенсивные гребни формировались также на западе Северной Америки: аномалия геопотенциала здесь составила  $9$  дам. Эти и тихоокеанские гребни во второй и третьей декадах мая часто распространялись в высокие и полярные широты, из-за чего вблизи полюса геопотенциал оказался на  $7$  дам больше нормы.

Положительные аномалии геопотенциала отмечались практически повсеместно в субтропиках и тропиках Северного полушария. Их наибольшие значения составили  $3$  дам на севере Индии,  $5$  дам на востоке Китая и  $7$  дам в центральных субтропиках Тихого океана.

Положение планетарной высотной фронтальной зоны в мае 2018 г. было близко к климатическому. Ее отклонения к северу происходили чаще всего над Скандинавией и Восточной Сибирью и в среднем за месяц составили  $5-8^\circ$ . Южнее, чем обычно, она располагалась над Уралом и Западной Сибирью: здесь отклонения тоже составили  $5-8^\circ$ . При этом практически на всем протяжении она была значительно обостренной.

Расчет индексов циркуляции показал, что зональный перенос был заметно интенсивнее в высоких широтах всех трех естественных синоптических районов (е. с. р.),

особенно в 3-м е. с. р., где индекс превысил норму на 68%. Меридиональный перенос немного интенсивнее, чем обычно, отмечался в высоких широтах 1-го и 2-го е. с. р. (на 31% и 21% соответственно). В целом по полушарию значения обоих индексов значительно отличались от нормы.

В осредненном за месяц поле приземного давления все основные центры действия атмосферы были выражены хорошо. Но особенной активностью отличалась атлантическая пара, в которой оба центра оказались значительно интенсивнее, чем обычно. Азорский максимум, несколько смещенный к западу, в течение всего мая 2018 г. оставался обширным и имел давление в центре на  $5-8$  гПа выше нормы. В среднем за месяц аномалии давления на всей занятой им территории субтропической зоны Атлантики составили  $3-6$  гПа. Очень активны были северо-восточные гребни азорского максимума, поддерживавшие формирование скандинавских и европейских антициклонов. На среднемесячной карте об этом свидетельствуют обширная зона положительных аномалий давления, занимающая практически всю Атлантику и северную половину Европы, и самостоятельный антициклон с центром на северо-западе Европейской России (аномалии до  $7$  гПа). Часто в течение месяца антициклоны, взаимодействуя, блокировали смещение атлантических циклонов на восток, вынуждая их либо стационаривать, либо двигаться по гораздо более северным траекториям. Значительная циклоническая активность в Северной Атлантике и часто аномальная глубина этих циклонов привели к тому, что исландский минимум в мае 2018 г. был очень обширным и глубоким: давление в его центре оказалось на  $13$  гПа ниже нормы. Восток Канады и почти вся Северная Атлантика оказались в зоне больших отрицательных аномалий давления (до  $-13$  гПа). Иногда в первой и третьей декадах мая атлантические циклоны смещались на юго-восток, оказывая влияние на Западную Европу и Средиземноморье. Активному циклогенезу в этих районах способствовал и вынос холода в высотных ложбинах. В итоге над Средиземным морем, севером Африки и Ближним Востоком сформировалась обширная область отрицательных аномалий давления до  $-3$  гПа. В связи с этим избыточное количество осадков выпало в мае на юге и в центральных районах Франции, на севере Испании, в Италии, в североафриканских

странах, в Греции, в Турции и на Ближнем Востоке. В Турции 5—12 мая сильнейшие ливни вызвали чрезвычайные дождевые паводки в Анкаре. Близкое к норме количество осадков отмечалось в странах Западной Европы, на Балканах, в центре и на северо-востоке Европейской России. На севере Европы, в Скандинавии, Польше, Прибалтике и на Украине, где в мае преобладала антициклональная погода, осадков выпало очень мало. При этом температурный фон на всей территории Европы был значительно выше нормы, практически повсеместно аномалии превысили 2—3°C; самые большие сформировались на севере Европы, в Скандинавии и в районе Шпицбергена, чаще всего находившихся под влиянием антициклонов и адвекции тепла с юга. Периоды аномальной жары нередко сменялись резкими похолоданиями, что неоднократно приводило к чрезвычайным ситуациям и опасным явлениям во многих европейских странах. Сильные ливни с грозами и крупным градом не раз отмечались в Германии, Франции, Англии: в Париже, Гамбурге дожди вызывали наводнения и подтопления. А 16 мая по западу Германии (Северная Рейн-Вестфалия) прошел мощный смерч, вызвавший серьезные разрушения. Такое не очень характерное для Европы явление было зафиксировано и в Белоруссии: 24 мая смерч возник при прохождении контрастного холодного фронта по Гомельской области.

Во власти активной циклонической деятельности в мае находились Западная Сибирь, Забайкалье и Якутия, о чем свидетельствует обширная область отрицательных аномалий давления (до  $-4$  гПа) над этими районами. Сибирский максимум окончательно уступил место на этих пространствах азиатскому сезонному минимуму. Лишь распространявшиеся с севера и северо-запада гребни охватывали своим влиянием Среднюю Азию и Афганистан (аномалии давления 3—6 гПа). При этом на южной периферии этих гребней и антициклонов происходила очень активная циклоническая деятельность. В первой половине мая сюда часто смещались циклоны с востока Средиземноморья. Холодные северные потоки на восточной периферии гребней обостряли их фронты и способствовали образованию новых контрастных фронтов и циклонов, на юге Азии уже господствовала предмуссонная жара. Аномалии давления на Кавказе, на Аравийском п-ове, на севере и в централь-

ных районах Индии составили  $-1...-4$  гПа. Количество осадков, выпавшее на востоке Турции, в Закавказье, в Ираке, на севере Ирана и Пакистана, значительно превысило норму. Сильные ливни и грозы приводили к разрушениям и гибели людей. Шквалистые усиления ветра неоднократно вызывали сильнейшие пыльно-песчаные бури на севере Индии и в странах Ближнего Востока (погибли люди).

Территория Сибири в мае 2018 г. находилась полностью во власти циклонов. На ее северные районы смещались, как правило, атлантические циклоны. На центральные и южные территории оказывали влияние европейские или южные циклоны. Аномалии давления в связи с этим повсеместно составили  $-2...-5$  гПа. На севере Урала и в Западной Сибири при господстве холодных тыловых потоков май был очень холодным: самые большие аномалии температуры отмечались в Омской области (таблица). В Восточной Сибири и на севере Якутии, напротив, было очень тепло, поскольку здесь преобладал южный вынос в теплых секторах циклонов. Распределение осадков оказалось довольно пестрым: избыток их отмечался на Урале, юге Западной Сибири, в Забайкалье и Якутии, на остальных территориях — норма и менее. Наиболее засушливые условия сложились на Чукотке, в дальневосточных районах России, в центре Монголии и на северо-востоке Китая, так как здесь преобладала антициклональная погода.

Муссон в Юго-Восточной Азии продвигался к северу в соответствии с климатическими сроками. Однако распространявшиеся с востока тихоокеанские гребни неоднократно вызывали его перебои. Избыточное количество осадков отмечалось на юге и востоке Китая, за исключением юго-восточных провинций. Нормальное и избыточное количество осадков выпадало также на Корейском п-ове и в Японии.

Индийский муссон начал свое продвижение над Бенгальским заливом в конце мая, что несколько позднее обычных сроков, но уже 28—30 мая в Мьянме шли сильнейшие дожди (до 288 мм за сутки). Избыточное количество осадков на юге и восточном побережье Индии было связано с влиянием тропических возмущений.

В тихоокеанской паре центров действия атмосферы гавайский максимум был довольно интенсивен в первой и третьей декадах мая. При этом, как правило, он располагался

**Наиболее значительные аномалии среднемесячной температуры воздуха в мае 2018 г.  
на территории России и их повторяемость**

Станция	Аномалия температуры, °С	Повторяемость, раз в число лет	Станция	Аномалия температуры, °С	Повторяемость, раз в число лет
Кемь	4,2	14	Улан-Удэ	2,3	26
Архангельск	2,8	7—8	Чита	3,6	65
Санкт-Петербург	4,2	20	Чара	3,0	40
Москва	3,1	8	Виллойск	1,9	6
Курск	3,7	14	Якутск	3,1	19
Астрахань	2,9	22	Алдан	3,3	18
Ставрополь	2,5	22	Усть-Мая	3,0	11
Новгород	3,6	27	Нерчинский	2,6	44
Ялта	3,4	69	Завод		
Волгоград	3,6	34	Охотск	2,2	110
Сургут	-4,2	33	Аян	2,8	54
Тобольск	-2,7	25	Эжимчан	3,7	100
Омск	-3,9	115	Благовещенск	2,4	19
Барнаул	-2,4	17	Хабаровск	2,1	12
Томск	-3,4	34	Поронайск	1,5	8—9
Баргузин	2,2	44	Петропавловск-	1,3	21
Витим	1,6	7	Камчатский		

западнее, чем обычно, и распространял свое влияние на восточное побережье Азии. Достаточно активны в течение месяца были также его северо-восточные гребни, влиявшие на погоду на западе Канады. В среднем за месяц смещение гавайского максимума к западу составило около 30° долготы, а занимаемая площадь и интенсивность были близки к норме.

Давление в алеутском минимуме, располагавшемся на своем обычном месте, было на 5 *гПа* меньше нормы. Тихоокеанские циклоны смещались в основном через Аляску на север Канады, где в связи с этим выпадало много осадков. Их фронты обострялись над южными провинциями Канады и Средним Западом США, поскольку здесь царил аномально жаркая погода. Избыточное количество осадков при этом выпало в центральных канадских провинциях и практически повсеместно в северной половине США. На востоке США фронты еще более обострялись, взаимодействуя с очень теплыми и влажными воздушными массами и вызывая сильнейшие ливни, грозы, град и отдельные торнадо. В северо-восточных штатах это приводило к внезапным наводнениям: например, в штате Мериленд всего за несколько часов выпало 150 *мм* осадков. В середине мая серьезные разрушения и гибель людей на северо-востоке США вызвали шквалы

при прохождении холодного фронта, когда ветер усиливался до 35 *м/с*.

Как уже отмечалось, на большей части Североамериканского континента май 2018 г. был очень теплым и даже жарким. Исключением стали лишь восточные канадские провинции, где под влиянием вторжения арктического воздуха было очень холодно, особенно на п-ове Лабрадор.

Много осадков выпало в мае на юге Мексики и в центрально-американских странах вследствие сезонного обострения внутритропической зоны конвергенции.

В тропической зоне Северного полушария в мае 2018 г. сформировалось 3 тропических циклона (норма 2,8).

Два циклона образовались в северной части Индийского океана (норма 0,7) в Аравийском море. Причем один из них, Сагар, возник в Аденском заливе, что случается чрезвычайно редко. Циклон достиг лишь стадии тропического шторма и 19 мая вышел на север Сомали, где от ливней, наводнений и ветра пострадали десятки тысяч жителей (16 человек погибли, 40 рыбаков пропали без вести). Спустя несколько дней на западе Аравийского моря возник следующий циклон, Мекуну, который был гораздо интенсивнее. В максимальной стадии своего развития он имел давление в центре 962 *гПа* и ветер более 55 *м/с*. Именно с такой скоростью он прошел вблизи о. Сокотра (погибли

и без вести пропали около 40 человек). 26 мая с такой же силой циклон обрушился на побережье Омана на границе с Йеменом. В г. Салала, принявшем на себя основной удар циклона, за сутки выпало 278 мм осадков, что в три раза превысило годовую норму. Следствием стали масштабные наводнения, невиданные в пустыне, разрушения и гибель 13 человек.

Один тропический циклон, первый в сезоне, образовался в Атлантике (норма 0,1). Его структура не соответствовала структуре тропического, поэтому циклон называли субтропическим, и он получил имя Альбер-

то. В стадии максимального развития его интенсивность соответствовала сильному тропическому шторму (давление 990 гПа, ветер около 30 м/с). Циклон возник в Мексиканском заливе около п-ова Юкатан, прошел западнее Кубы, где вызвал дождевые паводки. Затем 28 мая он вышел на побережье Флориды с ветром около 25 м/с и сильными дождями. Однако в силу особенностей его строения самые сильные дожди отмечались не вблизи центра, а значительно севернее: в Северной Каролине за сутки выпало 107 мм осадков.

### Метеорологические явления

В мае 2018 г. на территории России наблюдались следующие **опасные** гидрометеорологические явления (ОЯ).

В период 29 апреля — 4 мая в Республике Крым стояла аномально жаркая погода со средней суточной температурой воздуха выше климатической нормы на 7—9°C (максимальная температура 24—32°C).

Аномально жаркая погода со средней суточной температурой воздуха на 7—11°C выше климатической нормы отмечалась в период 1—5 мая в Брянской, 1—7 мая в Воронежской и Орловской, 3—7 мая в Курской, 3—8 мая в Липецкой, 4—9 мая в Белгородской областях (максимальная температура воздуха составила 30—32°C).

В период 2 мая — ночь 4 мая в Приморском крае наблюдался комплекс метеорологических явлений (КМЯ): отмечались обильные осадки (15—63 мм, в южной половине края 71—105 мм, или 35—160% месячной нормы). Наиболее интенсивно дождь, местами со снегом, шел ночью и днем 3 мая, а также ночью 4 мая. В 40 случаях количество выпавших осадков составило 15—35 мм за 12 ч и менее, очень сильный дождь был ночью 3 мая в п. Барабаш (юго-запад края) — 58 мм, днем 3 мая в п. Ольга (восток края) — 51 мм за 12 ч, в г. Владивосток ночью 3 мая в разных районах выпало 36—47 мм. Осадки сопровождался сильным ветром — до 17—24 м/с в континентальных районах, на побережье 27—30 м/с, на отдельных участках до 33—35 м/с (ураган), в отдельных районах прошел град, наблюдалась гроза, отмечались отложение мокрого снега и гололеда. В Приморском крае зафиксированы многочисленные сбои в электроснабжении, прошедшие дожди вызвали формирование

локальных паводков на большинстве рек края, наиболее значительные подъемы уровня воды (0,7—3,2 м) отмечались в южной половине края в бассейнах рек Раздольная (Уссурийский район), Илистая (Михайловский и Черниговский районы), Арсеньевка (Анучинский район), затоплены поймы рек Борисовка, Комаровка (Уссурийский район), Осиновка, Илистая в верхнем течении (Михайловский район), низкие места, участки дорог, на остальных реках край подъем воды составил 0,2—0,6 м.

4 мая в Забайкальском крае в период с 8 ч 41 мин 4 мая до 11 ч 20 мин 5 мая отмечался очень сильный ветер (25—26 м/с, по данным метеостанции Нижний Цасучей и метеостанции Беклемищево, порывы были до 25 м/с). В результате увеличилось число лесных и бытовых пожаров, в г. Борзя 4 мая ветром сорвало крышу со здания медицинского училища, произошел пожар в воинской части, загорелся уголь на Харанорском угольном разрезе.

4 мая на юге Сахалина отмечались сильные и очень сильные осадки в виде дождя и мокрого снега (23—38 мм за 12 ч), налипание мокрого снега (диаметром до 15 мм), ветер 20—23 м/с. За весь период выпало 32—51 мм осадков, что составило 40—73% месячной нормы осадков. На Сахалине вечером 4 мая на отдельных реках крайнего юга наблюдались подъемы уровней воды на 0,5—0,8 м; из-за плохой видимости и наличия на проезжей части мокрого снега было приостановлено движение автобусов по маршруту Южно-Сахалинск — Поронайск.

5 и 6 мая в Свердловской и Челябинской областях наблюдались заморозки (в воздухе -1...-6°C, на поверхности почвы -1...-9°C).

В течение суток 5 мая и ночью 6 мая в Кемеровской области, Алтайском крае и Республике Алтай наблюдался КМЯ: осадки в виде дождя и мокрого снега, местами сильные (15—22 мм за 12 ч), гроза, отложение мокрого снега диаметром 5—26 мм, усиление ветра до 17—22 м/с, в Кара-Тюреке (Республика Алтай) порывы до 30 м/с. В Кемеровской области из-за сильного ветра в шести районах отмечались локальные отключения электроэнергии, в Промышленном районе произошло обрушение опоры электропередач.

7 мая в Республике Крым отмечался очень сильный дождь: на метеостанции Симферополь в период с 11 ч 45 мин до 13 ч 30 мин выпало до 39,2 мм осадков; на метеостанции Севастополь в период с 18 ч 40 мин 8 мая до 3 ч 40 мин — до 48 мм. В г. Симферополь были подтоплены тротуары и дороги, некоторые улицы оказались полностью затоплены, что затрудняло движение автотранспорта, некоторые автомобилисты потеряли номерные знаки, в отдельных районах произошло кратковременное отключение электроэнергии, была нарушена работа Интернета и мобильной связи.

В период 8—19 мая в Свердловской, Челябинской и Курганской областях отмечались заморозки в воздухе  $-1...-8^{\circ}\text{C}$ , на поверхности почвы до  $-10^{\circ}\text{C}$ .

Заморозки зафиксированы также: в Башкортостане 10—14 мая в воздухе до  $-5^{\circ}\text{C}$ , на поверхности почвы до  $-4^{\circ}\text{C}$ , 17 мая местами в воздухе до  $-4^{\circ}\text{C}$ , на поверхности почвы до  $-5^{\circ}\text{C}$ ; 8—19 мая в Пермском крае в воздухе до  $-8^{\circ}\text{C}$ , на поверхности почвы до  $-10^{\circ}\text{C}$ ; 11 мая в Пензенской области на метеостанции Беднодемьяновск на поверхности почвы до  $-1^{\circ}\text{C}$ ; 15 и 16 мая в Кировской области на поверхности почвы до  $-6^{\circ}\text{C}$ ; 17 мая в Оренбургской области в воздухе до  $-4^{\circ}\text{C}$ , на поверхности почвы до  $-2^{\circ}\text{C}$ .

9 мая в Свердловской области на метеостанции Североуральск (ливнеопасный район) наблюдался очень сильный дождь (32 мм за 12 ч).

10 мая в Бурятии в н. п. Петропавловка (Джидинский район) в период с 9 ч 50 мин до 9 ч 58 мин отмечалось шквалистое усиление ветра до 26 м/с. Происходили отключения электроэнергии.

11 мая в Республике Крым очень сильный дождь прошел на метеостанции Ангарский Перевал: в период с 21 ч 30 мин 10 мая до 7 ч 31 мин выпало 30,8 мм осадков.

Заморозки отмечались 11 мая в Ленинградской области (до  $-1,3^{\circ}\text{C}$ ), в Новгородской области, Карелии, Московской и Ярославской областях (до  $-1,6^{\circ}\text{C}$ ), а также в Тверской (до  $-1,8^{\circ}\text{C}$ ) и Костромской областях (до  $-3,2^{\circ}\text{C}$ ).

Аномально жаркая погода со средней суточной температурой выше климатической нормы на  $7^{\circ}\text{C}$  и более стояла в период 13—17 мая в Ленинградской области и в г. Санкт-Петербург, а также в Карелии (13—15 мая средняя суточная температура составила 18— $22^{\circ}\text{C}$ , 16—17 мая — 17— $18^{\circ}\text{C}$ ).

В период 14—18 мая аномально жаркая погода со средней суточной температурой воздуха на  $7-10^{\circ}\text{C}$  выше климатической нормы отмечалась в Ярославской и Костромской областях.

14 мая в Тыве на метеостанции Шагонар в период с 6 до 12 ч, на метеостанции Хандагайты в период с 9 до 12 ч произошло шквалистое усиление ветра до 26 м/с.

14 мая в Чукотском автономном округе в районе г. Певек в период с 6 до 8 ч наблюдалось усиление юго-восточного ветра до  $20-25$  м/с с порывами до 35 м/с.

15 мая в Северной Осетии отмечался КМЯ. По результатам обследования, в период с 17 ч 15 мин до 21 ч в Дигорском районе (ст. Николаевская, г. Дигора, с. Дур-Дур) и в Ирафском районе на полях колхоза им. Калинина наблюдались сильный дождь, гроза, град диаметром 7—10 мм. На сельскохозяйственных полях сильным дождем были затоплены отдельные участки, отмечался смыв семян, растений и плодородного слоя почвы, значительные изменения рельефа из-за потоков воды, заливание, на части полей градом поврежден листовой аппарат растений, по данным руководителей хозяйств и администрации, в Дигорском районе повреждено около 500 га кукурузы и 90 га сои.

15 мая в Свердловской области отмечался очень сильный ветер. Согласно акту обследования, проведенного 18 мая, в населенных пунктах Кулига и Косяково (Алапавский район) в 2 км к северу от Каменска-Уральского 15 мая скорость ветра составляла  $24,5-28,4$  м/с (по шкале Бофорта). В Алапавском районе зафиксированы поломанные деревья, упавшие опоры, поврежденные крыши домов и дымовых колпаков, в 2 км от Каменска-Уральского была повалена железобетонная опора.

В Башкортостане на метеостанции Кумертау в период с 23 ч 26 мин 18 мая до

0 ч 5 мин 19 мая прошел сильный ливневый дождь (до 30 мм осадков).

18 мая в Забайкальском крае в п. Агинское (Агинский район) в период с 11 ч 38 мин до 11 ч 49 мин отмечался очень сильный ветер — до 25 м/с. Зафиксировано отключение электроэнергии.

Во второй половине дня 18 мая и в течение суток 19 мая в Новосибирской области, Алтайском крае, в течение суток 19 мая и ночью 20 мая в Республике Алтай наблюдался КМЯ: осадки в виде дождя и мокрого снега (до 8 мм за 12 ч), отложение мокрого снега диаметром 2—8 мм, местами установление временного снежного покрова высотой до 2 см, усиление ветра до 18—24 м/с, в Новосибирской области в Чанах порывы ветра до 23 м/с, в Карасуке до 25 м/с, в Багане до 27 м/с (по шкале Бофорта), в Кара-Тюрке (Республика Алтай) порывы достигали 29 м/с. В Новосибирской области в Багане сильными порывами ветра были полностью сорваны железная кровля и деревянные конструкции здания спортивной школы, площадь повреждения составила 300 м<sup>2</sup>, ущерб — более 870 тыс. руб., частично были повреждены парапеты из кирпича, сломаны деревья, повреждены заборы у населения, в Чанах в результате сильного ветра был сорван конек крыши здания метеостанции.

Днем 20 мая в Белгородской области отмечался КМЯ: гроза, местами град диаметром до 5 мм, сильный дождь (в г. Белгород — до 40 мм осадков, на гидропосту Шебекино — до 35 мм, на метеостанции Белгород — до 39 мм, в г. Старый Оскол — до 21 мм). По данным АПК Белгородской области, в Борисовском, Чернянском и Яковлевском районах от града и шквалистого ветра частично погибли посевы сои на площади 440 га, подсолнечника на 20 га, кукурузы на 850 га, сахарной свеклы на 1080 га.

20 мая в Башкортостане на метеостанции Емаша в период с 5 ч 50 мин до 5 ч 53 мин отмечалось шквалистое усиление юго-западного ветра (до 26 м/с). Были повреждены кровли строений (по обращениям граждан за справками о подтверждении ОЯ).

Сильный ливневый дождь с грозой прошел в Краснодарском крае 20 мая (на метеостанции Белореченск в период с 15 ч 30 мин до 16 ч 29 мин выпало 47 мм осадков), 21 мая (на метеостанции Краснодар (Круглик) в период с 18 до 19 ч — 30 мм, до 21 ч — 44,5 мм); в Адыгее 21 мая (по данным метеостанции Майкоп, в период с 16 ч

5 мин до 17 ч — 31 мм). По данным МЧС, в г. Краснодар 21 мая в западной и центральной частях города отмечались подтопления проезжих частей дорог, придомовых территорий, частных домовладений, проводилась откачка воды.

20 мая в Краснодарском крае и Республике Крым отмечался КМЯ. В результате обследования, проведенного начальником метеостанции Кропоткин (Краснодарский край), 20 мая в период с 17 до 19 ч в Кавказском районе (окрестности ст. Тимижбекская) и в период с 17 до 18 ч в Новокубанском районе (между хуторами Передовой и Горькая Балка, поля ИП Кеворкова) наблюдались сильный дождь, гроза, град диаметром 10—15 мм, которые сопровождались шквалистым ветром 13,9—17,1 м/с (по шкале Бофорта); днем 20 мая в Республике Крым на метеостанции Нижнегорский в период с 10 ч 50 мин до 15 ч отмечались сильный дождь (до 35 мм) и гроза. В результате непогоды 20 мая в Кавказском районе (Краснодарский край) произошло полегание озимой пшеницы на полях ООО “СК Восток” на площади 537 га, повреждены подсолнечник на 48 га и кукуруза на 103 га, из них 5—8 га смыты водой и заилено, размыты подъездные грунтовые дороги, в Новокубанском районе повреждены поля подсолнечника на площади 35 га, кукурузы — на 110 га, от града пострадал лиственный аппарат на 30—40%.

20 мая в Северной Осетии наблюдался КМЯ. В результате обследования, проведенного специалистом Северо-Осетинского ЦГМС, установлено, что 20 мая в правобережном районе Северной Осетии в с. Цаллык в период с 13 ч 50 мин до 16 ч 50 мин наблюдался очень сильный дождь, сопровождавшийся грозой и градом диаметром 5—15 мм. Отмечались скопление дождевой воды и размывы грунта, затопление дорог, дворов и приусадебных участков (уровень воды в с. Цаллык поднимался на 50—80 см), на полях отмечались затопление и заливание отдельных участков. Распоряжением главы администрации Правобережного района с 19 ч 20 мин в с. Цаллык введен режим ЧС муниципального характера.

20 мая в Ставропольском крае наблюдался КМЯ: днем, по данным метеостанции Изобильное, в период с 13 ч 36 мин до 14 ч 24 мин прошел ливневый дождь (до 27 мм) в сочетании с грозой и градом диаметром до 10 мм. В результате обследования, проведенного специалистом Северо-Осетинского

ЦГМС, установлено, что 20 мая в правобережном районе Северной Осетии в с. Раздзог в период с 13 ч 50 мин до 14 ч 20 мин наблюдался сильный дождь в сочетании с грозой и градом диаметром 5—10 мм (отдельные градины до 15 мм).

Днем 20 мая очень сильный ветер отмечался в Свердловской области в Сысертском районе: на метеостанциях Ирбит, Камышлов, Бисерть, Бутка — до 25 м/с, на метеостанции Туринская Слобода — 26 м/с, на метеостанции Тугулым и АМСГ Кольцово — 28 м/с (по шкале Бофорта). На юге Тюменской области в г. Тюмень скорость ветра достигала 27 м/с. В Сысертском районе отмечались изломанные и вырванные из земли с корнем деревья, сломанные и наклоненные опоры ЛЭП, поврежденные крыши и заборы жилых домов; в Тюмени зафиксированы повреждения кровли домов, автотранспорта, линий электроснабжения, один человек госпитализирован с травмой головы из п. Каскара (Тюменский район).

20 мая в Иркутской области наблюдался КМЯ: северо-западный ветер 16—21 м/с, мокрый снег и снег, в западных, центральных и северо-западных районах произошло установление временного снежного покрова в аномально поздние сроки высотой 2—7 см.

21 мая в Ростовской области по данным метеостанции Казанская, в период с 17 ч 5 мин до 17 ч 40 мин выпало до 56 мм осадков.

Заморозки отмечались 21 мая в Костромской области (на метеостанциях Шарья — до  $-1,7^{\circ}\text{C}$ , Кологрив — до  $-0,8^{\circ}\text{C}$ ), в Ярославской области местами в Пошехонском, Тутаевском и Ярославском районах в травостое и на высоте 2 см — до  $-2^{\circ}\text{C}$ , в Смоленской области (на метеостанциях Велиж в воздухе — до  $-1^{\circ}\text{C}$ , в Гагарине в травостое — до  $-3^{\circ}\text{C}$ ), в Тверской области в воздухе — до  $-0,4^{\circ}\text{C}$ .

Заморозки зафиксированы 21 мая в Кировской области местами в воздухе до  $-1^{\circ}\text{C}$ , на поверхности почвы  $-1...-4^{\circ}\text{C}$ , в Пермском крае на метеостанции Усть-Черная в воздухе до  $-2^{\circ}\text{C}$ ; 22 мая в восточных районах Башкортостана в воздухе  $-1...-3^{\circ}\text{C}$ , в Оренбургской области на метеостанции Троицкое на поверхности почвы до  $-1^{\circ}\text{C}$ .

В период 21—30 мая в Свердловской, Челябинской и Курганской областях отмечались заморозки в воздухе и на поверхности почвы  $-1...-7^{\circ}\text{C}$ .

22 мая в Ямало-Ненецком автономном округе на метеостанции Мужы и в Свердлов-

ской области на метеостанции Гари наблюдался очень сильный ветер (до 25 м/с).

Заморозки были 23 мая в Пермском крае в воздухе до  $-1...-3^{\circ}\text{C}$ .

23 мая в Туапсинском районе (Краснодарский край) наблюдался КМЯ: на метеостанции Горный в период с 14 ч до 14 ч 25 мин ливневый дождь (до 17 мм), гроза, шквалистое усиление ветра до 15 м/с, в период с 14 ч 4 мин до 14 ч 14 мин — град диаметром до 11 мм.

23 и 24 мая в Ставропольском крае и Северной Осетии прошел крупный град. По результатам обследования специалистом Ставропольского ЦГМС, крупный град наблюдался в н. п. Сенгилеевское (Шпаковский район) 23 мая в период с 20 ч до 20 ч 14 мин диаметром 20—25 мм, отдельные градины — 35 мм, он сопровождался сильным дождем и грозой. По данным наблюдений 24 мая в период с 14 ч 10 мин до 14 ч 14 мин в Андроповском районе (с. Казинка) и в период с 16 ч 30 мин до 16 ч 45 мин в Кировском районе (ст. Зольская) прошел крупный град (диаметр 20 мм). 24 мая в Северной Осетии был крупный град в период с 17 ч 15 мин до 17 ч 50 мин по результатам обследования в Правобережном районе (с. Цалык), а также — на территории 23 хозяйств (25 полей), расположенных в районе сел Раздзог, Заманкул, Зильги диаметром до 20 мм (отдельные градины 30—50 мм), который сопровождался грозой и шквалистым усилением ветра до 20,8—24,4 м/с (по шкале Бофорта). 23 мая в н. п. Сенгилеевское градом повреждены автомобили, в том числе школьный автобус, шиферная кровля жилых домов, поликарбонатные навесы; заилены огороды. По данным администраций с. Казинка и ст. Зольская, также градом повреждены автомобили, частично побиты овощные культуры на приусадебных участках, листья и завязь плодовых деревьев.

24 мая в Кабардино-Балкарии наблюдался КМЯ. По данным гидропоста Каменномостское, в период с 15 ч 30 мин до 15 ч 49 мин прошел сильный дождь (до 40,3 мм), наблюдались гроза, град диаметром до 6 мм; вечером 26 мая, по данным гидропоста Белая Речка, были сильный дождь (до 35,6 мм), гроза, по косвенным признакам, на р. Нальчик произошел сход склонового грязевого микроселя. В Северной Осетии 24 мая — ночью 25 мая, по данным МРСК «Севкавказэнерго», в Ардонском районе отключалась одна ЛЭП 110 кВ, 24 мая на полях

отмечались скопление воды, затопление и заиливание значительной площади, размыв полевых дорог, смыв посевов кукурузы и местами плодородного слоя почвы, на отдельных полях — вынос потоками воды мусора и карча, в с. Цалык подтоплены 47 домовладений, а также дворы, улицы, приусадебные участки, образовался слой ила от 10 до 30 см, по данным руководителей хозяйств и отдела сельского хозяйства администрации Правобережного района, повреждено около 1100 га кукурузы; 24 мая на полях и в с. Цалык наблюдалось повреждение градом листового аппарата и стеблей растений, листьев деревьев и сбитые завязи, общая площадь повреждения кукурузы — 1100 га.

24 мая в центральных районах Ставропольского края на метеостанции Александровское в период с 15 ч 30 мин до 20 ч прошел очень сильный дождь — до 73,5 мм осадков (из них в период с 15 ч 30 мин до 16 ч 1 мин сильный ливневый дождь — 40 мм). В Кабардино-Балкарии наблюдался очень сильный грозовой дождь: 25 мая на метеостанции Бабугент — до 51,8 мм осадков; 26 мая на гидропосту Кременчуг-Константиновское в период с 4 ч 30 мин до 12 ч 30 мин выпало 51,9 мм осадков (из них в период с 11 ч 30 мин до 12 ч 30 мин сильный ливневый дождь — 38,4 мм) с грозой; в Северной Осетии 24 мая в период с 17 до 22 ч, по результатам обследования, в Правобережном районе (с. Цалык), а также на территории 23 хозяйств (25 полей), расположенных в районе сел Раздзог, Заманкул, Зильги наблюдался очень сильный дождь с грозой и шквалистым усилением ветра 20,8—24,4 м/с (по шкале Бофорта), 25 мая в период с 16 ч 30 мин до 20 ч на метеостанции Михайловское (Пригородный район) — 102,9 мм, на гидропосту Ольгинское (Правобережный район) — 59,2 мм, на метеостанции Эльхотово в период с 20 ч 25 мая до 8 ч мин 26 мая — 51,2 мм.

24 мая очень сильный ветер отмечался в Ямало-Ненецком автономном округе на метеостанции Белоярск с порывами до 25 м/с, в Свердловской области на метеостанции Тугулым — до 28 м/с.

Днем 24 мая на юге Тюменской области скорость ветра в Тюменском районе по шкале Бофорта достигла 21—24 м/с, в Упоровском и Бердюжском районах 25—28 м/с (по результатам обследования, проведенного 25 мая, и с учетом характера повреждения). По оперативным данным ГУ МЧС России по

Тюменской области, частично разрушены кровли домов, повалены деревья, заборы, перевернуты остановки, в Тюменском, Упоровском и Бердюжском районах сильным ветром сорваны крыши, частично повреждены строения, повалены деревья.

24—26 мая в сельскохозяйственных районах Хабаровского края и Еврейской автономной области местами отмечались заморозки до  $-2^{\circ}\text{C}$ .

Заморозки зафиксированы 25—26 мая в Вологодской области — до  $-1^{\circ}\text{C}$ .

Заморозки были также в Костромской области 25 мая в травостое до  $-3^{\circ}\text{C}$ , 26 мая в воздухе до  $-3,6^{\circ}\text{C}$ , в травостое до  $-6^{\circ}\text{C}$ ; в Ярославской области в травостое 25 и 26 мая до  $-4^{\circ}\text{C}$ , 26 мая во Владимирской области до  $-2^{\circ}\text{C}$ , в Тверской области до  $-0,7^{\circ}\text{C}$ , в Ивановской области до  $-5^{\circ}\text{C}$ ; 26 мая в Московской области (на метеостанции Черусти в травостое до  $-1^{\circ}\text{C}$ , на метеостанции Можайск в травостое до  $-2^{\circ}\text{C}$ ).

Заморозки наблюдались 25 и 26 мая в земледельческой зоне центральных, южных районов Красноярского края, Хакасии и Тывы в воздухе и на поверхности почвы  $-1...-6^{\circ}\text{C}$ , 26 и 27 мая в Иркутской области  $-1...-3^{\circ}\text{C}$ . В Иркутской области подмерзли цветущие плодово-ягодные культуры, неукоренившаяся рассада капусты.

25 и 26 мая в Бурятии наблюдался КМЯ: осадки в виде дождя и мокрого снега (до 14 мм, в Окинском районе 26 мм за 9—10 ч), в юго-западных районах — снег с установлением временного снежного покрова высотой до 5 см, усиление ветра до 18—20 м/с, гроза, понижение температуры днем на  $8-21^{\circ}\text{C}$ . Из-за сильного ветра и выпадения снега в Улан-Удэ, в Окинском районе произошло отключение электроэнергии, без света остались жители поселков Заречный, Солдатский, Исток, Левый Берег и пяти населенных пунктов Окинского района.

Заморозки отмечались 26—29 мая местами на севере Приволжского федерального округа на поверхности почвы до  $-3^{\circ}\text{C}$ ; 25—29 мая в Кировской области в воздухе  $-1...-2^{\circ}\text{C}$ , на поверхности почвы до  $-4^{\circ}\text{C}$ ; в Пермском крае 27 мая в воздухе и на поверхности почвы до  $-2^{\circ}\text{C}$ , на метеостанции Вая 29 мая в воздухе и на поверхности почвы до  $-2^{\circ}\text{C}$ ; в Ульяновской области 27 мая на метеостанции Инза в воздухе до  $-2^{\circ}\text{C}$ ; 29 мая в воздухе до  $-3^{\circ}\text{C}$ , на поверхности почвы до  $-2^{\circ}\text{C}$ ; в Пензенской области 26 мая на метеостанции Городище на поверхности

почвы до  $-1^{\circ}\text{C}$ , 27 мая в воздухе и на поверхности почвы до  $-1^{\circ}\text{C}$ , 29 мая в воздухе и на поверхности почвы до  $-2^{\circ}\text{C}$ ; в Саратовской области 27 мая в воздухе  $-1\dots-2^{\circ}\text{C}$ , на поверхности почвы до  $-1^{\circ}\text{C}$ ; в Самарской области 27 мая в воздухе и на поверхности почвы  $-2\dots-3^{\circ}\text{C}$ , 29 мая на поверхности почвы  $-1\dots-2^{\circ}\text{C}$ ; в Оренбургской области 27 мая в воздухе до  $-4^{\circ}\text{C}$ , на поверхности почвы до  $-6^{\circ}\text{C}$ ; в Башкортостане 26 и 27 мая в воздухе  $-1\dots-6^{\circ}\text{C}$ , на поверхности почвы  $-1\dots-4^{\circ}\text{C}$ , 29 мая в северных и восточных районах в воздухе  $-1\dots-3^{\circ}\text{C}$ , на поверхности почвы до  $-2^{\circ}\text{C}$ ; в Татарстане 26, 27 и 29 мая в воздухе до  $-1^{\circ}\text{C}$ , на поверхности почвы до  $-2^{\circ}\text{C}$ . По данным ГУ МЧС России по Пензенской области, в отдельных районах области на приусадебных частных участках отмечены частичная гибель и повреждения теплолюбивых культур; в Самарской области в отдельных районах на частных приусадебных участках зафиксированы частичная гибель и повреждения теплолюбивых культур, высаженных в открытый грунт; по данным отделов сельскохозяйственных администраций районов Саратовской области, 27 мая в приусадебных частных хозяйствах Петровского, Озинского, Красноармейского районов зафиксированы повреждение и частичная гибель теплолюбивых культур; в Учалинском районе Башкортостана в ООО «Байрамгул» пострадали посевы козлятника на площади 262 га, в ООО «Авангард» — посевы ярового ячменя на площади 30 га.

27 мая в Зуевском районе (Кировская область) отмечалось усиление ветра до 15–18 м/с. По результатам обследования с участием специалиста Кировского ЦГМС — филиала Верхне-Волжского УГМС, — установлено, что по характеру разрушения скорость ветра по шкале Бофорта достигала 24,5–28,4 м/с.

28 мая в Оренбургской области на метеостанции Орск в период с 8 ч 3 мин до 9 ч отмечался очень сильный ветер (до 25 м/с). По данным ГУ МЧС России по Оренбургской области, в результате очень сильного ветра произошли нарушения в функционировании объектов ЖКХ.

Заморозки зафиксированы 29 мая в Костромской области на метеостанциях Вохма и Шарья в воздухе — до  $-1^{\circ}\text{C}$ .

29 мая в Тыве на метеостанции Хандагайты между 12 и 15 ч отмечалось шквалистое усиление ветра с порывами до 29 м/с.

30 мая шквалистое усиление ветра также было во Владимирской области (на метеостанции Ковров — до 25 м/с), в Ивановской области (на метеостанции Иваново — до 26 м/с, на метеостанции Шуя — до 29 м/с). По данным ГУ МЧС России, отмечались нарушение электроснабжения, падение деревьев, срыв кровли с крыш.

Днем и вечером 30 мая в Приволжском федеральном округе зафиксирован очень сильный ветер: в Татарстане, по данным метеостанций Кайбицы, Вязовые, Отарка, Челны, — до 25 м/с. По результатам проведенного вечером обследования установлено, что в Казани скорость ветра достигала 24,5–28,4 м/с (по шкале Бофорта), в Ульяновской области на метеостанции Инза в период с 13 ч 20 мин до 13 ч 40 мин — до 26 м/с; в Чувашии на метеостанции Пореккое в период с 14 ч 15 мин до 14 ч 20 мин — шквал 26 м/с, в период с 11 ч 20 мин до 12 ч 45 мин наблюдался очень сильный северо-западный ветер 26 м/с, порывы до 31 м/с; в Марий Эл по данным метеостанции Йошкар-Ола, в период с 9 ч 12 мин до 9 ч 24 мин был шквал 25 м/с; в Нижегородской области, по данным АМЦ Нижний Новгород, в период с 9 ч 52 мин до 10 ч 4 мин отмечался шквал до 28 м/с; в Кировской области на метеостанции Нолинск в период с 10 ч 30 мин до 10 ч 40 мин и на метеостанции Вятские Поляны в период с 11 ч 40 мин до 11 ч 55 мин — 25 м/с; в Самарской области на метеостанции Серноводск в период с 15 ч 9 мин до 15 ч 25 мин — 28 м/с; в Ульяновской области в период с 11 до 18 ч — до 28 м/с.

По сведениям МЧС России, в 29 муниципальных образованиях Республики Татарстан произошло отключение электроснабжения 85 населенных пунктов с населением более 46 000 человек, произошло падение 41 дерева, осветительной опоры, повреждены кровли 52 жилых домов, строений и административных зданий, пострадало 21 автотранспортное средство, получили травмы 12 человек, из них трое детей, одна женщина от полученных травм в результате падения кровли магазина в с. Муслумово скончалась. В г. Казань произошло отключение электроснабжения в с. Константиновка и Кировском районе с населением около 22 000 человек, повреждены кровли 12 зданий, в том числе колледжа малого бизнеса, купола академии тенниса им. Гарпишева и театра им. Гинчурина, повалено 24 дерева, повреждено 20 автомобилей. По данным МЧС России и

актам обследования, в большинстве районов Кировской области, Чувашии, Марий Эл, Мордовии и Удмуртии отмечались обрывы линий электропередач, повреждения зданий, газовых трубопроводов, транспорта, отключение электроэнергии, падение деревьев; по данным ГУ МЧС России по Самарской области, зарегистрированы нарушения электроснабжения в 25 населенных пунктах девяти районов, газоснабжения в трех населенных пунктах трех районов, частично повреждены кровли домов и социально значимых объектов в восьми населенных пунктах семи муниципальных районов на площади 2300 м<sup>2</sup>, в том числе здания основного терминала аэропорта Курумоч, в результате падения деревьев пострадали восемь человек, из них пять госпитализированы; по данным ГУ МЧС России по Ульяновской области, в большинстве районов ветром были повреждены крыши 41 жилого дома, из-за поваленных сильным ветром деревьев произошли многочисленные обрывы ЛЭП, что привело к аварийным отключениям электроэнергии, в г. Ульяновск и Цильнинском районе из-за падения дерева на газопровод было отключено газоснабжение, зафиксировано падение дерева на автомобиль.

Днем 30 мая в Удмуртии, Мордовии и Нижегородской области зафиксирован КМЯ: ливневый дождь, гроза, град, очень сильный

ветер (20—25 м/с, в Нижегородской области до 27 м/с). По данным МЧС России и актам обследования, в большинстве районов Мордовии и Удмуртии отмечались обрывы линий электропередач, повреждения зданий, газовых трубопроводов, транспорта, отключение электроэнергии, падение деревьев.

В конце дня 30 мая и в течение суток 31 мая в Новосибирской области и Алтайском крае наблюдался КМЯ: дождь (11—13 мм за 12 ч), в Новосибирской области местами сильные дожди (17—36 мм за 12 ч), гроза, усиление ветра до 19—24 м/с, в Горняке (Алтайский край) — до 29 м/с, на метеостанции Остров Дальний и в Обской обсерватории (Новосибирская область) — 25—27 м/с.

Заморозки отмечались 31 мая в воздухе в Костромской области (на метеостанциях Шарья до -1°C, Вохма — до -2°C), в Ивановской области (в Кинешме до -4°C, в Приволжске — до -3°C), в Ярославской области (на метеостанциях Ярославль и Данилов до -1°C).

31 мая на севере Приволжского федерального округа местами отмечались заморозки на поверхности почвы -1...-4°C.

Информация о **неблагоприятных явлениях**, наблюдавшихся на территории России в мае 2018 г., приведена на сайте журнала [www.mig-journal.ru](http://www.mig-journal.ru).

### Гидрологические явления

В мае 2018 г. **приток воды** в Ивановское, Шекнинское, Рыбинское и Нижнекамское водохранилища был на 20—35% меньше нормы, в Угличское, Горьковское, Чебоксарское и Камское водохранилища — близким к ней. Приток воды в Куйбышевское водохранилище превысил норму в 1,3 раза. Суммарный приток воды в водохранилища на Волге и Каме составил в мае 68,7 км<sup>3</sup> (норма 72,0 км<sup>3</sup>).

На Южном Урале приток воды в Павловское водохранилище на р. Уфа был близким к норме, в Ириклинское водохранилище на р. Урал — на 20% меньше нее.

Приток воды в Цимлянское водохранилище в мае был на 65% больше нормы.

Приток воды в большинство водохранилищ на реках северо-запада европейской части России, Карелии и Кольского п-ова был на 20—60% больше нормы, в остальные водохранилища — близким к ней.

На Северном Кавказе приток воды в Краснодарское водохранилище на р. Кубань, к Чиркейской ГЭС на р. Сулак и к Владикавказской ГЭС на р. Терек был преимущественно близким к норме.

В мае 2018 г. приток воды в водохранилища на Оби, Енисее и Ангаре был близким к норме, на Зее — на 40% меньше нее. Больше обычного (в 2,9 раза) притекло воды в Колымское водохранилище.

### Морские гидрологические явления

Неблагоприятные условия погоды в районах плавания российских судов в мае 2018 г. наблюдались в северо-западной ча-

сти Тихого океана, здесь зафиксировано 18 дней с ветрами 15 м/с и более (норма 11 дней), в Беринговом море дней с такими

условиями было 11 (норма), в Охотском — 2 (норма 6), в Японском — 1 (норма 4), в Норвежском — 9 (норма 5), в Северном — 3 (норма 2), в Баренцевом — 6 (норма 5), в Балтийском — 1 (норма), в Черном море — 1

(норма), в Азовском море — 1 (норма), в Каспийском море — 1 (норма 4).

В Северной Атлантике отмечено 2 случая с опасными явлениями (высота волн 8 м и более).

### Погода в Москве и Подмоскowie

Май 2018 г. в столице по температурно-моду осадков незначительно больше нормы. В период 1—9, 11—19, 21—28 и 30 мая средняя суточная температура воздуха была выше нормы. Наиболее теплыми были дни с 1 по 9 мая, с 12 по 18 мая, 23, 24, 27 и 30 мая, когда средняя суточная температура воздуха была на 3—9°C выше нормы. Лишь 10, 20 и 31 мая средняя суточная температура воздуха была на 1—4°C ниже нормы.

По данным метеостанции ВДНХ, самая высокая температура воздуха (27,9°C) отмечалась днем 2 мая (лишь на 0,3°C ниже абсолютного максимума для этого дня), самая низкая (4,0°C) была ночью 11 мая. Заморозков в мае 2018 г. в Москве (по данным метеостанции ВДНХ) не наблюдалось. Средняя месячная температура воздуха в мае 2018 г. составила 16,2°C (на 3,1°C выше нормы).

Осадков за месяц выпало 61 мм (119% нормы), отмечалось 10 дней с осадками  $\geq 0,1$  мм (норма 12,5).

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации; e-mail: golubev@mecon.ru

Поступила  
9 VII 2018 г.

УДК 551.510.534:551.506.7&lt;&lt;2018.04/06&gt;&gt;(047)(47+57)

## Содержание озона над территорией Российской Федерации во втором квартале 2018 г.

А. М. Звягинцев\*, Н. С. Иванова\*, Г. М. Крученицкий\*, И. Н. Кузнецова\*\*,  
В. А. Лапченко\*\*\*, В. В. Широцов\*\*\*\*

*Обзор составлен по результатам эксплуатации системы мониторинга общего содержания озона (ОСО) над Россией и прилегающими территориями, действующей в оперативном режиме в Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО). Для мониторинга ОСО использованы данные отечественной сети фильтровых озонметров М-124, работающей под методическим руководством Главной геофизической обсерватории. Качество работы всей системы оперативно контролируется по наблюдениям с помощью спутниковой аппаратуры OMI (НАСА, США). Обобщены основные данные наблюдений ОСО за каждый месяц второго квартала 2018 г. и за квартал в целом. Также приведены результаты регулярных наблюдений за содержанием озона в приземном слое, проводимых в Московском регионе и Крыму.*

Средние значения общего содержания озона (ОСО) для второго квартала в целом и каждого из его месяцев над Россией и прилегающими территориями за период 1974—1984 гг., были представлены в [2]. Во втором квартале 2018 г. средние за квартал значения ОСО над всей контролируемой территорией были близки к норме (рис. 1а). Максимальный дефицит среднего за квартал значения ОСО зарегистрирован на станции Тикси; он достигал 5%, или 2,1 единицы среднеквадратического отклонения (ед. СКО). Среднее за квартал значение ОСО максимально превысило норму на станциях Самара и Николаевск-на-Амуре (превышение 5%, или 2,1 и 2,2 ед. СКО соответственно).

Наименьшие средние за квартал значения ОСО (340—355 е. Д.) наблюдались над Казахстаном, наибольшие (400—436 е. Д.) — над островами Северного Ледовитого океана, Магаданской областью, Камчаткой, Сахалином и Приморьем. Над остальной частью контролируемой территории средние за квартал значения ОСО составляли 355—400 е. Д.

Качество данных со станций Красноярск, Семипалатинск, Чарджоу и Гурьев во

втором квартале 2018 г. не позволяет использовать их для анализа полей озона.

В апреле 2018 г. среднемесячные значения ОСО над всей контролируемой территорией были близки к средним многолетним (рис. 1б). Максимальный дефицит среднемесячного значения ОСО зарегистрирован на станциях Тикси и Тура (8%, или 1,7 и 1,6 ед. СКО соответственно), максимальное превышение нормы наблюдалось в Самаре и Николаевске-на-Амуре (5%, или 1,0 и 1,1 ед. СКО соответственно).

В мае 2018 г. среднемесячные значения ОСО над всей контролируемой территорией также были близки к норме (рис. 1в). Максимальный дефицит среднемесячного значения ОСО зарегистрирован в Петропавловске-Камчатском; он составил 6%, или 1,4 ед. СКО. Максимальное превышение нормы наблюдалось в Омске, Томске и Николаевске-на-Амуре (6%, или 1,4, 1,5 и 1,4 ед. СКО соответственно).

В июне среднемесячные значения ОСО над контролируемой территорией в основном были близки к норме (рис. 1г). Максимальный дефицит среднемесячного значения ОСО зарегистрирован на станциях

\* Центральная аэрологическая обсерватория; e-mail: oom@cao-rhms.ru.

\*\* Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации.

\*\*\* Карадагская научная станция им. Т. И. Вяземского — природный заповедник Российской академии наук.

\*\*\*\* Научно-производственное объединение “Тайфун”.

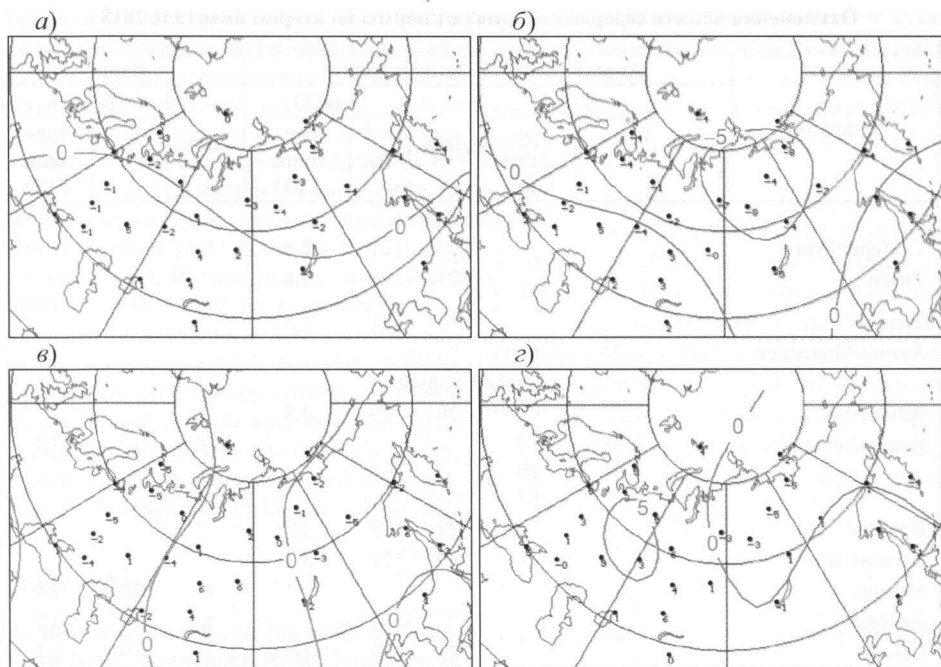


Рис. 1. Поле отклонений (%) общего содержания озона от среднего многолетнего в апреле — июне (а), апреле (б), мае (в) и июне (з) 2018 г.

Тикси и Оленек; он составил 5%, или 1,5 и 1,3 ед. СКО соответственно. Аномальное превышение нормы отмечалось на станции Самара; оно достигало 9%, или 2,6 ед. СКО.

В таблице приведены данные об аномальных отклонениях от нормы среднесуточных значений ОСО, которые регистрировались на станциях озонометрической сети во втором квартале 2018 г.

Расчеты ультрафиолетового индекса (УФИ) для центральной части Европейской России, проведенные на основе данных об ОСО и облачности в Москве и области [3], показали, что в мае 2018 г. среднемесячное значение УФИ составило 4,7, а в июне — 4,8. В мае пять дней максимальные в течение дня значения УФИ превышали 5,5 (порог, выше которого населению необходимо использовать средства защиты от солнечного УФ-излучения). В июне таких дней было восемь, из них три дня УФИ превышал 6,5. По результатам измерения УФИ в Санкт-Петербурге (Воейково) в мае 2018 г. среднемесячное значение УФИ составило 3,8, а в июне — 3,7. Значения УФИ, превышающие 5,5, в Санкт-Петербурге в мае и в июне 2018 г. зарегистрированы не были.

По данным станций мониторинга приземного озона в Московском регионе, в Калужской области (г. Обнинск) и в при-

брежной полосе Крымского п-ова во втором квартале 2018 г. приземные концентрации озона (ПКО) находились в основном в диапазоне средних сезонных значений [1, 4]. На рис. 2 представлены максимальные за сутки значения ПКО в рассматриваемых пунктах, которые отражают общие механизмы формирования озонового режима в приземном воздухе. На общие условия формирования озонового режима в центральных областях России указывает тесная связь значений ПКО в Москве и Обнинске; коэффициент корреляции  $R$  усредненных за час ПКО в этих пунктах составил 0,81. Слабая связь содержания озона в приземном слое в Московском регионе с данными измерений в Крыму ( $R \approx 0,3$ ) свидетельствует о различающихся атмосферных процессах, определявших изменчивость ПКО. В центральных областях России средние за месяц значения ПКО были близки к норме, в отличие Крыма, где в апреле и июне 2018 г. они превысили норму более чем на  $0,01 \text{ мд/м}^3$ . Апрель в Крыму (как и июнь) оказался теплее обычного, а осадков выпало меньше нормы. На среднее значение ПКО в мае повлияла прохладная погода во второй декаде — средние за месяц концентрации озона в приземном слое оказались меньше нормы.

**Отклонения общего содержания озона от нормы во втором квартале 2018 г.**

Станция	Апрель			Май			Июнь		
	Дата	Δ ОСО		Дата	Δ ОСО		Дата	Δ ОСО	
		%	еди- ницы СКО		%	еди- ницы СКО		%	еди- ницы СКО
Меньше нормы									
Екатеринбург				23	21	2,8			
Тикси				25	16	2,6			
Тура				1	21	2,8			
Ханты-Мансийск	14	25	2,6						
Больше нормы									
Алма-Ата				20	29	3,9			
Владивосток	7	35	3,7				21	17	2,7
	8	34	3,6						
	9	25	2,7						
Иркутск				21	20	2,7			
Караганда				30	21	3,1			
Москва							6	22	3,0
Печора							6	20	2,7
Самара				28	19	2,6	1	19	2,7
							7	20	2,7
							10	20	2,9
							11	20	2,9
Санкт-Петербург							5	20	2,6
							8	26	3,4
Ханты-Мансийск							13	20	2,7
							23	19	2,7
о. Хейса							26	18	3,1

Суточные максимумы ПКО в июне и мае в природном заповеднике Карадаг не превышали 0,11 мг/м³. Максимальная во втором квартале концентрация приземного озона здесь наблюдалась 6 апреля и достигала 0,119 мг/м³ (рис. 2). Этот максимум ПКО

зафиксирован при адвекции теплого воздуха из северо-восточной акватории Черного моря в часы интенсивного вертикального перемешивания.

В Москве наибольшие концентрации приземного озона 0,13—0,15 мг/м³ регистри-

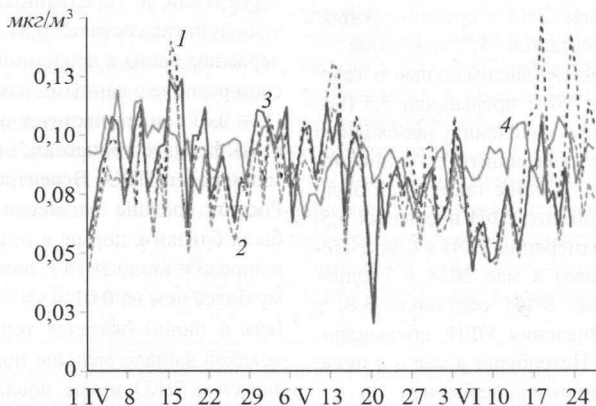


Рис. 2. Изменение суточного максимума приземной концентрации озона в апреле — июне 2018 г. 1 — центр Москвы; 2 — среднее значение по Москве; 3 — Обнинск; 4 — Карадаг.

ровались днем 18 и 23 июня. Повышение содержания озона в приземном слое стало следствием фотохимического образования озона в загрязненном городском воздухе из-за предшествующих утром неблагоприятных для рассеивания метеоусловий. Следует отметить имевший место в Москве не характерный для середины апреля эпизод увеличения ПКО почти до 0,85 ПДК<sub>м.р</sub> 15—16 апреля. В этом эпизоде повышение ПКО до 0,128—0,140 мг/м<sup>3</sup> происходило на удалении от источников городского загрязнения при поступлении воздушных масс, прошедших над Белоруссией и Украиной по периферии антициклона, обусловившего аномально теплую и сухую погоду в середине апреля. Можно заметить, что в Центральной и Юго-Восточной Европе почти весь

апрель стояла по-летнему теплая и сухая погода, температура выше 25°C во второй и третьей декадах месяца была обычным явлением. Суммы осадков не превысили здесь и трети месячной нормы (<https://meteoinfo.ru/climvar>).

Случаев превышения ПДК<sub>м.р</sub> отечественного стандарта (0,16 мг/м<sup>3</sup>) в пунктах мониторинга ПКО во втором квартале не наблюдалось. При этом случаи превышения установленного ВМО критерия безопасного содержания приземного озона на основе средней 8-часовой скользящей концентрации (не более 0,1 мг/м<sup>3</sup>) отмечались на крымском побережье 6 раз (4 в апреле и 2 в июне), в Москве — 11 (по 3 случая в апреле и мае, 5 — в июне).

## Литература

1. Звягинцев А. М., Беликов И. Б., Еланский Н. Ф., Кузнецова И. Н., Романюк Я. О., Сосонкин М., Тарасова О. А. Изменчивость концентрации приземного озона в Москве и Киеве. — Метеорология и гидрология, 2010, № 12, с. 26—35.

2. Звягинцев А. М., Иванова Н. С., Какаджанова Г., Крученицкий Г. М., Шалыгина И. Ю. Содержание озона над территорией Российской Федерации во втором квартале

2008 г. — Метеорология и гидрология, 2008, № 8, с. 123—126.

3. Иванова Н. С. Методы прогноза общего содержания озона и УФ-индекса. — 2010; <http://method.meteor.ru/methods/pollut/uv/uv.html>.

4. Лапченко В. А., Звягинцев А. М. Приземный озон в Крыму. — Пространство и время, 2014, № 2 (16), с. 254—257.

Поступила в редакцию 10 VII 2018 г.

## ВНИМАНИЕ!

В журнале “Метеорология и гидрология” № 6 за 2018 г. допущены опечатки.

В статье “Оценка изменения годовой суммы активных температур и количества осадков за вегетационный период для территории России и соседних стран” (авторы — Е. Н. Попова, И. О. Попов, С. М. Семенов) на с. 98 (аффилиация) **следует читать:**

\*\* Институт глобального климата и экологии Росгидромета и Российской академии наук; e-mail: [en\\_porova@mail.ru](mailto:en_porova@mail.ru), [igor\\_o\\_porov@mail.ru](mailto:igor_o_porov@mail.ru), [SergeySemenov1@yandex.ru](mailto:SergeySemenov1@yandex.ru).

В статье “Отклик бореальных древостоев на современные изменения климата на севере европейской части России” (авторы — Г. М. Черногаева, А. Е. Кухта) на с. 111 (аффилиация) **следует читать:**

Г. М. Черногаева\*, \*\*, А. Е. Кухта\*\*, \*

\* Институт глобального климата и экологии Росгидромета и Российской академии наук; e-mail: [gmchernogaeva@gmail.com](mailto:gmchernogaeva@gmail.com).

\*\* Институт географии Российской академии наук.

## Георгий Георгиевич Щукин (к 80-летию)

25 августа 2018 г. исполнилось 80 лет Георгию Георгиевичу Щукину — ведущему российскому ученому в области дистанционного зондирования и радиометеорологии, доктору физико-математических наук, заслуженному деятелю науки Российской Федерации и Кабардино-Балкарской Республики, профессору Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского.

После окончания в 1961 г. радиотехнического факультета Ленинградского института точной механики и оптики Г. Г. Щукин в течение 50 лет работал в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (ГГО), где прошел путь от младшего научного сотрудника до директора филиала ГГО — Научно-исследовательского центра дистанционного зондирования атмосферы.

Разработанные при участии Георгия Георгиевича метода СВЧ-радиометрического определения характеристик облаков, осадков, водной поверхности и ледового покрова нашли применение при анализе данных, полученных в 1968 г. с искусственного спутника Земли “Космос-243”. Г. Г. Щукин и его ученики провели исследования взаимосвязи между радиофизическими характеристиками и метеорологическими параметрами атмосферы и облаков, которые стали основой для изучения микрофизических характеристик облаков и контроля за их состоянием. Под научным руководством Георгия Георгиевича и при его непосредственном участии выполнен большой объем теоретических и экспериментальных работ. Исследован механизм распространения радиоволн в разных метеорологических условиях и установлена зависимость интенсивности радиотеплового излучения атмосферы от рефракции. Результаты этих исследований были использованы при оценке эффективности корабельных радионавигационных систем и влияния атмосферной рефракции на дальность их действия. Разработана автоматическая система метеообеспечения авиации, объединяющая подсистемы наземных метеорологических и радиолокационных наблюдений, а также средства приема спутниковой информации, которая установлена в аэропорту Внуково. Создана сеть штормового оповещения об опасных явлениях погоды, связанных с облаками (ливень, гроза, град, смерч), на базе метеорологических радиолокаторов МРЛ-2 и МРЛ-5. Подготовлено техническое задание и проведены испыта-

ния первого отечественного доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С (2007—2010 гг.), используемого на сети Росгидромета.

Г. Г. Щукин является основателем научного направления — комплексного пассивно-активного радиолокационного зондирования окружающей среды (методов активной радиолокации и радиотеплолокации), получившего широкое применение в области контроля активных воздействий на метеорологические процессы. Под его руководством была осуществлена серия работ в области активного воздействия на облака в разных регионах России и за рубежом. За обеспечение благоприятных условий погоды в дни празднования 300-летия Санкт-Петербурга Указом Президента Российской Федерации Георгий Георгиевич был награжден медалью “В память 300-летия Санкт-Петербурга”.

Под научно-методическим руководством Г. Г. Щукина и при его непосредственном участии с 2006 г. ведутся работы в области метеорологического обеспечения пусков ракет космического назначения на космодромах Байконур и Восточный.

Научную деятельность Георгий Георгиевич успешно сочетает с педагогической. Он является руководителем научной школы “Дистанционное зондирование атмосферы” (ВНШ-45 МО РФ), председателем Северо-Западного отделения Научного совета РАН по комплексной проблеме “Распространение радиоволн” и председателем секции “Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы”, членом трех докторских диссертационных советов и редколлегий четырех научных журналов. Им подготовлено 7 докторов и 23 кандидата наук. Он — автор более 500 научных работ, включая 10 монографий. Г. Г. Щукин в качестве сопредседателя возглавлял подпроект “Дистанционное зондирование” рабочей группы российско-американского соглашения о сотрудничестве в области охраны окружающей среды, являлся научным руководителем проекта в рамках советско-вьетнамского сотрудничества в области радиолокационных исследований тропических циклонов, членом рабочей группы по метеорологической радиолокации Комиссии ВМО по приборам и методам наблюдений, научным руководителем проекта подспутниковых полигонных исследований в рамках Международной комплексной программы “Природа”.

За успехи в научно-производственной деятельности Г. Г. Щукин награжден орденом “Знак Почета”, медалью “Ветеран труда”. Ему вручен нагрудный знак “Почетный работник Гидрометеослужбы России” и присвоено почетное звание “Заслуженный метеоролог Российской Федерации”. За заслуги в области дистанционного зондирования атмосферы и радиолокации он стал

лауреатом научной премии губернатора Ленинградской области и Санкт-Петербургского научного центра РАН. Его биография опубликована в Биографической энциклопедии “Отечественная радиолокация”.

Сердечно поздравляем Георгия Георгиевича Щукина с юбилеем, желаем ему крепкого здоровья, семейного благополучия, дальнейших творческих успехов.

*Коллектив Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского*

## К 50-летию Сибирского центра “НИЦ “Планета”

Сибирский центр Федерального государственного бюджетного учреждения “Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии “Планета” (СЦ ФГБУ “НИЦ “Планета”) — ведущая организация, осуществляющая эксплуатацию национальных космических систем, оперативный спутниковый мониторинг и развитие технологий в области дистанционного зондирования Земли на территории Сибири. 1 августа 2018 г. Сибирский центр отметил 50-летний юбилей. Центр входит в структуру ФГБУ “НИЦ “Планета” и является одним из трех региональных центров, составляющих единый комплекс гидрометеорологической службы России.

Начало образованию центра было положено в 1965 г., когда в Новосибирский филиал Гидрометцентра СССР доставили аппаратуру МА-9 МСТ для радиотелеметрической станции РТС-9. Подобные станции устанавливались только на военных объектах и предназначались для контроля работы бортовых систем искусственных спутников Земли (ИСЗ). Для эксплуатации станции и для ее технического обслуживания в Новосибирском филиале Гидрометцентра СССР было создано новое подразделение — лаборатория № 251. На РТС-9 принималась лишь телеметрическая информация, которую специалисты центра не могли использовать в оперативной работе. Во второй половине 1960-х годов Соединенные Штаты Америки уже осуществляли запуск метеорологических спутников Земли типа “Нимбус”, “Тайрос”, “ESSA”. Поэтому было принято решение силами специалистов лаборатории провести работу по приему и регистрации информации с американских ИСЗ. В качестве приемного было использовано отечественное профессиональное устройство Р-313. Целеуказания для ведения антенны рассчитывали вручную. Принятую информацию регистрировали на фототелеграфный аппарат “Нева”,

скорость вращения вала и шаг подачи каретки которого были подстроены под параметры сигнала со спутника. Проведенная работа по приему и регистрации спутниковой информации увенчалась успехом. В Новосибирске был получен первый космический снимок.

В 1966 г. в 30 километрах от Новосибирска (зона, свободная от промышленных помех) была выбрана площадка, где началось строительство выносного пункта приема информации. 1 августа 1968 г. были организованы отдел анализа спутниковых данных и отдел приема и регистрации спутниковой информации.

50-летний юбилей Сибирский центр отмечает в составе Федерального государственного бюджетного учреждения “Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии “Планета”. В рамках реализации масштабной программы по технической модернизации центра за последние 7 лет введены в эксплуатацию новейшие НКПОР по приему и обработке данных российской группировки космических аппаратов. В настоящее время в Сибирском центре функционирует 12 аппаратно-программных комплексов, на которые ежедневно за около 70 сеансов поступает информация с 16 отечественных и зарубежных низкоорбитальных космических аппаратов. Данными дистанционного зондирования и созданными на их базе продуктами обеспечиваются оперативно-прогностические подразделения Обь-Иртышского, Западно-Сибирского, Среднесибирского, Иркутского и Забайкальского УГМС, Авиаметтелеком Росгидромета. Осуществляется методическое и технологическое сопровождение системы сбора и передачи данных с наблюдательной сети Росгидромета через космические аппараты. На территории Уральского и Сибирского регионов специалистами Сибирского центра проводится научно-методическая работа,

направленная на расширение сферы использования спутниковой информации в гидрометеорологии, экологии, климатических исследованиях, а также для обнаружения и мониторинга чрезвычайных ситуаций. Сибирский центр регулярно принимает участие в профильных конференциях и семинарах. Активная выставочная деятельность, осуществляемая центром, отмечена многочисленными дипломами и наградами.

Перед СЦ ФГБУ “НИЦ “Планета” стоят задачи, поставленные правительством Российской Федерации, в области развития кос-

мической деятельности. Профессионализм и высокая ответственность сотрудников за качество выполняемой работы позволяют Сибирскому центру достигать значительных результатов в решении задач по развитию государственной территориально-распределенной системы космического мониторинга Росгидромета.

Поздравляем коллектив Сибирского центра ФГБУ “НИЦ “Планета” с юбилеем и желаем дальнейших успехов в научной и трудовой деятельности.

## Памяти Анатолия Михайловича Звягинцева (1945—2018 гг.)

8 июня 2018 г. после продолжительной болезни скончался главный научный сотрудник отдела озонного мониторинга Центральной аэрологической обсерватории, доктор физико-математических наук Анатолий Михайлович Звягинцев.

В Центральной аэрологической обсерватории А. М. Звягинцев работал с 1985 г. Он был одним из ведущих специалистов России в области исследования атмосферного озона. В 2013 г. в МГУ им. М. В. Ломоносова он защитил докторскую диссертацию, посвященную изучению пространственно-временной изменчивости озона в тропосфере. В 1986—1995 гг. под руководством Анатолия Михайловича и при его непосредственном участии в Центральной аэрологической обсерватории был разработан отечественный озонзонд. В 1991 г. он начал проводить регулярные наблюдения за концентрацией приземного озона. В середине 1990-х годов совместно с коллегами им была выполнена серия работ, результаты которых свидетельствовали о заметном вкладе динамических факторов в кратко- и долговременные изменения озонного слоя. С конца 1990-х годов и до своей кончины основное внимание А. М. Звягинцев уделял исследованию тропосферного озона. Им были разработаны и в дальнейшем утверждены ЦМКП Росгидромета “Методика прогноза максимальных уровней приземного озона в Москве” и “Методика прогнозирования суточных максимумов концентрации приземного озона” (2008 г.; совместно со специалистами Главной геофизической обсерватории и Гидрометцентра России). В период аномально жаркой погоды в июле 2010 г. он осуществлял мониторинг концентрации озона и

предоставлял прогноз. Полученную информацию публиковали на сайте Росгидромета. За проделанную работу А. М. Звягинцев был награжден памятной медалью МЧС “Участнику ликвидации пожаров 2010 года”.

В течение последних 15 лет Анатолий Михайлович являлся основным автором Национального сообщения Российской Федерации для Всемирной метеорологической организации, которое составлялось Центральной аэрологической обсерваторией с участием российских научных организаций, занимающихся исследованием и мониторингом озонного слоя. Длительное время он был активным участником российско-индийского научного сотрудничества в области изучения стратосферного и приземного озона. В 2015 г. совместно с индийским коллегой была опубликована статья, посвященная анализу трендов общего содержания озона с 1979 по 2014 г., которая стала базовой при формировании российскими учеными направления исследований влияния климатических факторов на состояние озонного слоя.

Большое внимание Анатолий Михайлович уделял работе с молодыми специалистами из научных организаций Росгидромета, РАН и Высшей школы, занимающихся изучением и мониторингом озонного слоя и загрязнений приземного воздуха. Был автором и рецензентом статей в научно-техническом журнале “Метеорология и гидрология” и в других научных изданиях.

Светлая память об Анатолии Михайловиче Звягинцеве — душевном, добром, отзывчивом и творческом человеке, прекрасном специалисте — навсегда сохранится в сердцах его учеников, сотрудников и коллег.

*Центральная аэрологическая обсерватория*

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К РУКОПИСИ СТАТЬИ

1. Объем статьи не должен превышать 15 страниц формата А4, включая список литературы, таблицы и рисунки (не более трех).
2. В комплект статьи входят основной текст, состоящий примерно из следующих разделов: введение, материалы и методы исследования, результаты, обсуждение, выводы; аннотация (не более 12 строк, отдельно на русском и английском языках с названием и фамилиями авторов, дающая ясное представление о содержании статьи); перечень ключевых слов; список литературы (в алфавитном порядке фамилий авторов — сначала русских, затем иностранных); таблицы (с заголовками, напечатанными через два интервала), графический материал; список подрисовочных подписей и сведения об авторах. Все перечисленное должно быть представлено в двух экземплярах и на отдельных листах.  
В комплект статьи также входят акт экспертизы (с подписью руководителя и печатью организации) и сопроводительное письмо (с подписью руководителя организации или учреждения, где работают авторы) с указанием, что статья ранее не публиковалась в других отечественных и зарубежных изданиях.  
Авторы должны предоставить статью также в электронном виде: текст в формате Microsoft Word, рисунки — Tiff. При этом рисунки и таблицы не следует вставлять в текст статьи. Рисунки должны быть представлены в двух вариантах: черно-белом и цветном.  
В связи с изданием журнала в США авторы могут предоставить перевод статьи, при этом вариант статьи на английском языке должен быть полным и точным, оба текста — идентичными.
3. Текст должен быть напечатан четким шрифтом через два интервала (прямой шрифт Times New Roman, кегль 12) на одной стороне стандартного листа (формат А4) плотной белой бумаги с полями: нижнее и левое — 25 мм, правое — 10 мм, верхнее — 20 мм.
4. Математические и химические обозначения и формулы должны быть напечатаны с соблюдением размеров прописных и строчных букв. Необходимо дать расшифровку всех используемых в статье параметров, включая подстрочные и надстрочные индексы, а также всех аббревиатур (условные сокращения слов). Следует также соблюдать единообразие терминов и обозначений.  
Иностранные фамилии, используемые в статье и отсутствующие в списке иностранной литературы, должны приводиться в скобках на языке оригинала.
5. Рисунки в электронном виде предоставляются в формате Tiff с разрешением 650 dpi. Цветные рисунки должны содержать только 8-битный цвет. Цветовое пространство должно соответствовать содержанию рисунка: если он содержит только черные и белые точки — Bitmap, если полутона — Grayscale, если цвет — CMYK или RGB. Толщина линий на рисунках должна быть не менее 0,3 pt или 0,13 мм. Запрещается использование точечных закрасок в программах работы с векторной графикой. Максимальный размер рисунка 124 × 176 мм.  
Все надписи на рисунках выполняются в основном прямым шрифтом Times New Roman, кегль 9, допускается использование меньшего кегля (не ниже 7) для второстепенных подписей; гидрография подписывается шрифтом Arial курсивом. Для подписи изолиний целесообразно использовать шрифт Arial, кегль 6—8.
6. Рукопись должна быть подписана авторами с указанием фамилии, имени и отчества (полностью), ученой степени и звания, домашнего адреса, телефонов, адреса электронной почты, названия учреждения, в котором была выполнена работа, и его почтового адреса (с указанием индекса).
7. При публикации статьи указываются две даты — дата поступления и дата получения редакцией доработанного варианта статьи. Просьба о доработке статьи не означает, что она принята к печати. После доработки статья вновь рассматривается редколлегией. В случае принятия редколлегией статьи к опубликованию ее перевод может быть размещен в англоязычной версии журнала — “Russian Meteorology and Hydrology”.
8. Подписанная авторами рукопись статьи является оригиналом для печати. Вносить в верстку статьи значительные исправления и дополнения против оригинала авторам не разрешается.
9. Редакция сохраняет за собой право делать необходимые редакционные исправления, дополнения, сокращения.
10. Редакция не вступает в дискуссию с авторами.

*Мног*

**По каталогу Роспечати “Газеты. Журналы”**

**Индекс 70536**  
для индивидуальных  
подписчиков

**Индекс 70525**  
для предприятий  
и организаций

**Индекс 71683**  
(годовая подписка)

**По объединенному каталогу “Пресса России”**

**Индекс 87789**  
для индивидуальных  
подписчиков

**Индекс 87788**  
для предприятий  
и организаций

ISSN 0130-2906 “Метеорология и гидрология”, 2018, № 8, 1–144



**ФГБУ “Научно-исследовательский центр  
космической гидрометеорологии “Планета”**

**2018**