

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

ТРУДЫ
СИБИРСКОГО РЕГИОНАЛЬНОГО
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Выпуск 109

ПРОБЛЕМЫ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ,
ЭКОЛОГИИ, КЛИМАТА СИБИРИ

МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

ТРУДЫ
СИБИРСКОГО РЕГИОНАЛЬНОГО
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Выпуск 109

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

Под редакцией
доктора технических наук *В.Н. Копылова*

НОВОСИБИРСК
2025

УДК 551.5
ББК 26.23
Т78

Труды Сибирского регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института / под ред. В.Н. Копылова; Мин-во природ. ресурсов и экологии РФ, Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. – Новосибирск: СО РАН, 2025. – ISSN 0320-359X
Вып. 109: Проблемы гидрометеорологических прогнозов, экологии, климата Сибири. – 2025. – 336 с.

ISBN 978-5-6052503-0-2

В настоящем сборнике представлены результаты исследований в области краткосрочных и долгосрочных гидрометеорологических прогнозов, климатологии, экологии Сибири и смежных регионов, в том числе Арктики.

Представлены результаты долгосрочного прогноза расходов в бассейне реки Иртыш. Дана климатическая оценка повторяемости гроз, сильных ливней, метелей в Западной и Восточной Сибири, сильных ветров в Карском море, синоптических условий этих явлений. Описаны тенденции климата зимних и летних сезонов, режима ледовитости в регионе Карского моря. Представлены результаты создания автоматизированной технологии обработки и анализа оперативной метеорологической и агрометеорологической информации; изложены соображения по методам представления погодно-климатической информации для СМИ. Дана климатическая характеристика атмосферных вихрей (циклонов и антициклонов) в Западной Сибири в условиях современного глобального потепления климата, описано влияние Сибирского антициклона на погоду Поволжья. Проведен анализ многолетних данных испарения с водной поверхности по России и параметров испарения со снежного покрова в Арктике. Описаны региональные особенности гидрохимического режима рек Обского бассейна, содержания загрязняющих веществ в почве, растительности, поверхностных водах рек Прибайкалья, баланса метана в Саяно-Шушенском водохранилище. Исследуются возможности применения алгоритмов нейронных сетей для прогноза погоды.

Сборник рассчитан на специалистов, работающих в сфере службы погоды, гидрометеорологии, климатологии и экологии.

УДК 551.5
ББК 26.23

ISBN 978-5-6052503-0-2

© СибНИГМИ, 2025
© Оформление. Сибирское отделение РАН, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Ильющенкова И.А., Иванов Б.В., Священников П.Н., Карандашева Т.К.</i> Повторяемость экстремальных скоростей ветра на побережье Карского моря в условиях современного изменения климата	5
<i>Морозова С.В., Полянская Е.А., Алимтиева М.А.</i> Особенности влияния зимнего азиатского антициклона на Нижнее Поволжье в различные периоды климатической изменчивости	17
<i>Карандашева Т.К., Иванов Б.В., Ревина А.Д.</i> Современные тенденции «суровости» зим/«комфортности» летних месяцев в регионе Карского моря	39
<i>Горбатенко В.П., Шкель Е.И., Тунаев А.Л.</i> Анализ многолетней изменчивости числа дней с грозой над Западной Сибирью	66
<i>Токарев В.М.</i> Квантильно-климатический анализ годового хода температуры и технология его использования в оперативном метеобеспечении	82
<i>Поднебесных Н.В.</i> Изменчивость характеристик циклонов и антициклонов, их сезонные особенности и воспроизведение реанализом в конце XX – начале XXI в.	93
<i>Иванова С.А., Боронина А.С.</i> Многолетняя динамика испарения с водной поверхности на территории России	110
<i>Лебедева В.М., Найдина Т.А., Калашников Д.А., Знаменская Я.Ю.</i> Оперативное агрометеорологическое прогнозирование в автоматизированных технологиях «Информационно-прогностическая система» и «АРМ-Агропрогноз»	125
<i>Гайдукова Е.В., Салаурова К.Ю., Винокуров И.О.</i> Краткосрочное прогнозирование расходов воды с различной заблаговременностью на крупных реках (на примере бассейна реки Иртыш)	138
<i>Завалишин Н.Н., Игнатов А.В., Бочкарева Е.Г., Гололобов В.В., Пальчикова Н.В.</i> Результаты оперативных испытаний метода прогноза притока воды в Новосибирское водохранилище	151

<i>Даниленко А.О., Коваленко Д.Е.</i> Региональные особенности гидрохимического режима участков рек Обского бассейна с минимальной антропогенной нагрузкой	160
<i>Пастухов Б.В., Парамонов С.Г., Бурцева Л.В., Конькова Е.С., Безделова А.П.</i> Содержания ряда приоритетных загрязняющих веществ в почве, растительности и поверхностных водах в долинах рек северо-восточного Прибайкалья	178
<i>Колкер А.Б., Гочаков А.В., Газимов Т.Ф., Дель И.В.</i> Исследование возможностей нейросетевой модели прогноза погоды GraphCast для Урало-Сибирского региона	218
<i>Воронина Л.А., Зувев К.В., Котов М.С., Гочаков А.В.</i> Автоматизированная web-технология обработки и анализа оперативной метеорологической и агрометеорологической информации, поступающей в телеграммах кода КН-21	237
<i>Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Гочаков А.В., Збираник А.А., Газимов Т.Ф.</i> Синоптические условия формирования экстремальных осадков на юге Восточной Сибири и в Монголии в летний период	254
<i>Калюжный И.Л., Василевич И.И., Секисов Н.Л.</i> Общие черты формирования испарения со снежного покрова в условиях Арктики	280
<i>Ананова Л.Г., Коваленко А.П., Мацедон В.Ю.</i> Метеорологические и синоптические условия возникновения низовых и общих метелей в Томской области	297
<i>Мишин Д.В., Строков А.А., Репина И.А.</i> Оценка баланса метана в Саяно-Шушенском водохранилище за трехлетний цикл наблюдений 2021–2023 годов	317

ПОВТОРЯЕМОСТЬ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ ВЕТРА НА ПОБЕРЕЖЬЕ КАРСКОГО МОРЯ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

И.А. Ильющенко¹, Б.В. Иванов^{1,2},
П.Н. Священников¹, Т.К. Карандашева¹

¹ ГНЦ «Арктический и антарктический
научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург

² Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург

В последние десятилетия в Арктике наблюдаются значительные климатические изменения, которые в научной литературе получили название «Арктическое усиление». Это проявляется в том, что потепление климата здесь протекает в 2–3 раза быстрее, чем в умеренных широтах, что может сказываться на изменении повторяемости опасных погодных явлений, оказывающих влияние на осуществление (ограничение) хозяйственной деятельности в арктических регионах. В первую очередь это имеет отношение к транспортным операциям на трассах Северного Морского пути и к разведке и эксплуатации углеводородных ресурсов. Проанализированы данные стандартных метеорологических наблюдений на четырех метеорологических станциях, расположенных в непосредственной близости к трассам Северного Морского пути и лицензионным участкам российских компаний. Для анализа повторяемости экстремальных усилений скорости ветра использовались данные восьмисрочных наблюдений за средней и максимальной скоростью ветра. Проведен анализ повторяемости случаев усиления скорости ветра от 25 м/с и более. Выявлены месяцы, когда повторяемость таких усилений существенно увеличивается. Рассмотрены сезонные и многолетние изменения повторяемости данного вида опасных погодных явлений. Наибольшая повторяемость усиления ветра от 25 м/с и более на всех исследуемых станциях наблюдается в зимний период с октября по март. В юго-западной части Карского моря с 2000 г. отмечаются смена тенденции и увеличение повторяемости экстремальных скоростей ветра.

Ключевые слова: Западная Арктика, Карское море, опасные погодные явления, усиление ветра

REPEATABILITY OF EXTREME WIND SPEEDS ON THE KARA SEA COAST DURING THE PERIOD OF MODERN CLIMATE CHANGE

I.A. Ilyushchenkova¹, B.V. Ivanov^{1,2},
P.N. Svyashchennikov¹, T.K. Karandasheva¹

¹ *State Scientific Center of the Russian Federation Arctic
and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg*

² *Saint Petersburg State University, Saint Petersburg*

In recent decades, significant climatic changes have been observed in the Arctic, which have been called “Arctic amplification” in the scientific literature. This is manifested in the fact that the climate warming here is 2–3 times faster than in middle latitudes, which may affect the change in the frequency of hazardous weather conditions that affect the implementation (restriction) of economic activity in the Arctic regions. First of all, this is related to transport operations on the Northern Sea Route and for the exploitation of hydrocarbon resources. The data from standard meteorological observations at four weather stations located in close to the Northern Sea Route are analyzed. To analyze the wind frequencies and intensities, data of the average and maximum wind speeds from observations taken 8 times per day at four weather stations were used. The analysis of wind frequencies and intensities from 25 m/s and more is carried out. Months have been identified when the frequency of such winds increases significantly. Seasonal and long-term changes in the frequencies of this type of hazardous weather conditions are considered. The highest frequency of wind increases to 25 m/s and more at all considering stations is observed in the winter period from October to March. In the southwestern part of the Kara Sea, since 2000, there has been change in the trend and increase of extreme wind speeds frequency.

Keywords: Western Arctic, Kara Sea, hazardous weather conditions, heavier winds

Введение

Во многих сферах хозяйственной деятельности (строительство, транспорт и т.п.) важны не столько средние климатические оценки (режим), сколько именно экстремальные значения. Усиления скорости ветра до экстремальных значений пред-

ставляют собой серьезную угрозу для безопасности населения, промышленной и транспортной деятельности, функционирования объектов инфраструктуры и экосистем.

В третьем оценочном докладе Росгидромета [1] отмечается тенденция к увеличению числа опасных погодных явлений (ОПЯ). В работе [2] отмечается тенденция к увеличению средней скорости ветра в Арктике в конце XX и начале XXI веков. В исследовании [3] указывается на то, что в последние десятилетия в Арктике увеличилось количество циклонов при заметном изменении их траекторий. При этом изменилось количество так называемых полярных мезомасштабных циклонов [4]. Ветровой режим в морях Российской Арктики подробно представлен в ряде Атласов [5, 6]. В Западной Арктике наблюдаются интенсивная циклоническая деятельность и частые усиления ветра [7]. Результаты моделирования показывают повышение количества штормов, в том числе и в Карском море [8].

Установление закономерностей повторяемости ОПЯ играет ключевую роль в разработке методов прогнозирования и предупреждения их последствий. В связи с этим исследования, посвященные анализу и моделированию усиления ветра, приобретают все большее значение в метеорологии и климатологии. В литературе можно встретить различные подходы к анализу усиления ветра и их зависимости от атмосферных процессов. Например, в работе [9] рассматриваются четыре основных типа атмосферной циркуляции, при которой наблюдаются высокие значения приземной скорости ветра в Западной Арктике. В исследовании [10] анализируются усиления ветра различного происхождения в морях Российской Арктики, включая и синоптическую природу штормовых ветров. Штормовые ветры чаще всего возникают на фронтальных разделах, особенно при холодных фронтах [11].

Целью настоящего исследования является анализ повторяемости усиления ветра (экстремальных значений) на четырех метеорологических станциях, расположенных на побережье

Карского моря в современный период, выявление сезонных и межгодовых изменений.

Анализ и результаты

Для анализа повторяемости ОПЯ, связанных с усилением ветра, в исследовании используются данные восьмисрочных наблюдений за средней и максимальной скоростью ветра за период с 1977 по 2022 г., данные доступны в архивах ВНИИГМИ-МЦД¹. Проведен анализ повторяемости случаев усиления ветра от 25 м/с и более. В табл. 1 приведён список используемых метеорологических станций и пропуски в рядах наблюдений за скоростью ветра.

Для рассматриваемых станций выявлены месяцы с наибольшей повторяемостью усиления ветра, результаты приведены на рис. 1. На станции Диксон (рис. 1, *а*) наиболее часто встречаются усиления ветра до значений 25 м/с и более в зимний период — в декабре и январе (1,3 и 1,1 % соответственно). В июле и августе наиболее низкая повторяемость усиления

Таблица 1

Список используемых метеорологических станций и пропуски в рядах наблюдений

Название станции	Синоптический индекс	Географические координаты	Пропуски данных, года
Диксон	20674	73.5° с.ш. 80.4° в.д.	—
Мыс Стерлегова	20476	75.4° с.ш. 88.8° в.д.	01.2003, 01.2014, 12.2022
ОГМС им. Е.К. Федорова (мыс Челюскин)	20292	77.7° с.ш. 104.3° в.д.	—
Амдерма	23022	69.8° с.ш. 61.7° в.д.	—

¹ ВНИИГМИ-МЦД. <http://meteo.ru/data/> (дата обращения: 15.01.2025 г.)

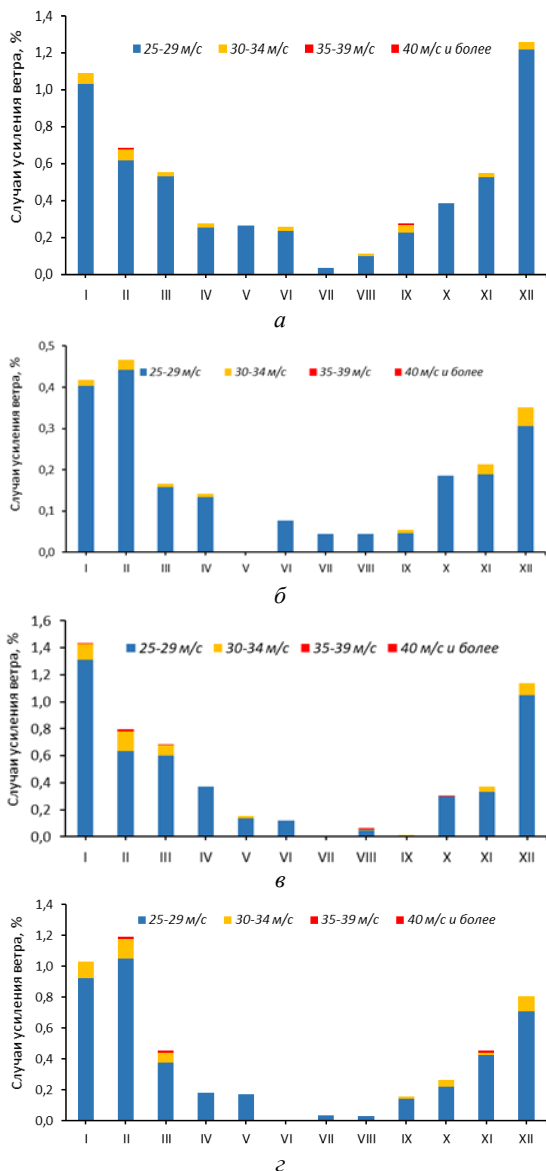


Рис. 1. Сезонное распределение повторяемости усиления ветра до 25 м/с и выше на станциях Диксон (а), мыс Челюскин (б), мыс Стерлегова (в), Амдерма (г)

ветра от 25 м/с и более (0,1 % и менее), не отмечалось усиленный ветра от 30 м/с и более за рассматриваемый период в июле и октябре. В районе станции мыс Челюскин (рис. 1, б) в январе и феврале отмечается наибольшая повторяемость усилений ветра (0,4 и 0,5 % соответственно). За исследуемый период с 1977 по 2022 г. в мае не было отмечено усилений ветра от 25 м/с и более, с июня по август не отмечались усиления ветра от 30 м/с и более, повторяемость усилений ветра в интервале 25–29 м/с с июня по сентябрь наиболее низкая (0,1 % и менее), по сравнению с другими месяцами. За период с 1977 по 2022 г. в районе мыс Стерлегова (рис. 1, в) наибольшая повторяемость усилений ветра отмечается в декабре и январе (1,1 и 1,4 % соответственно), наименьшая повторяемость с июля по сентябрь (0,1 % и менее). В апреле, июне и июле за исследуемый период не отмечено усилений ветра от 30 м/с и более. На станции Амдерма (рис. 1, г) наибольшая повторяемость усилений ветра от 25 м/с и более отмечается в январе и феврале (1,0 и 1,2 % соответственно). За исследуемый период с апреля по август не отмечено усилений ветра от 30 м/с и более. С июля по август наименьшая повторяемость усилений ветра от 25 м/с и более (менее 0,1 %). Выявленный сезонный ход соответствует усилению интенсивности атмосферной циркуляции в зимний период.

Резюмируя вышесказанное, можно сделать вывод, что наибольшая повторяемость усилений ветра для всех станций отмечается в холодный период года с октября по март. Для анализа межгодовой изменчивости повторяемости усилений ветра в дальнейшем рассмотрена повторяемость в среднем за холодный период с октября по март. На рис. 2 представлена межгодовая изменчивость усилений ветра с 1977 по 2022 г. На станциях, расположенных в юго-западной части Карского моря, при аппроксимации временного ряда полиномом второй степени отмечается смена тенденции: в районе Диксона (рис. 2, а) в 1999–2001 гг., а на станции Амдерма (рис. 2, г) в 1996–1998 гг.

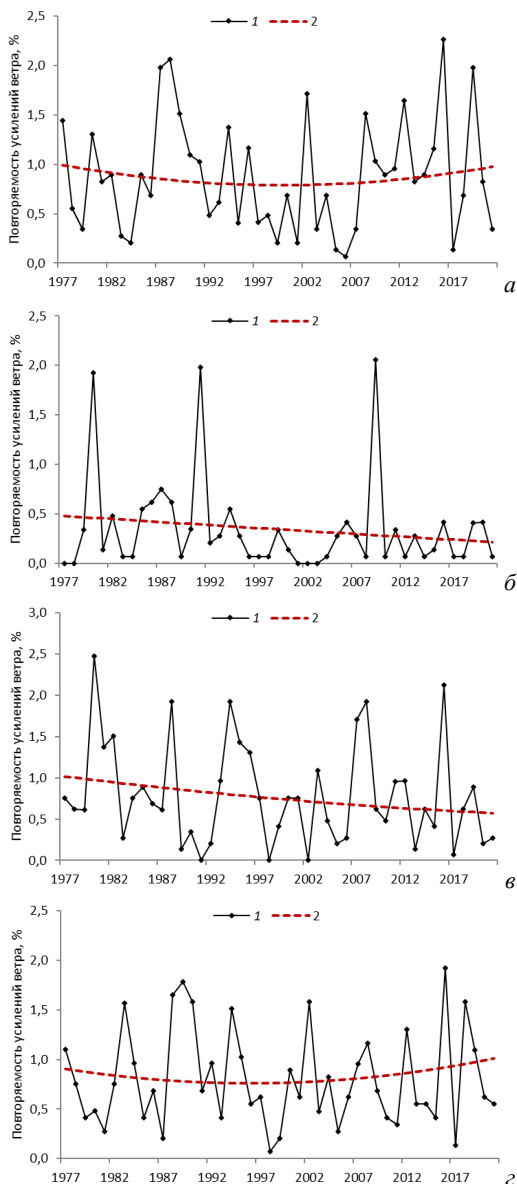


Рис. 2. Межгодовая изменчивость повторяемости усилений ветра до 25 м/с и более на станциях Диксон (а), мыс Челюскин (б), мыс Стерлегова (в), Амдерма (г): 1 — повторяемость усилений ветра за холодный период, %, 2 — полиномиальный тренд второй степени

Таблица 2

Статистические характеристики повторяемости усиления ветра на станциях юго-западной части Карского моря для холодного периода года (среднее — средняя повторяемость за период, σ^2 — дисперсия исследуемого периода)

Параметр	Диксон		Амдерма	
	1977–1999	2000–2022	1977–1997	1998–2022
Среднее, %	0,88	0,87	0,89	0,79
σ^2 , % ²	0,29	0,37	0,25	0,29

В северо-восточной части Карского моря в районе мыса Челюскин (рис. 2, б) и мыса Стерлегова (рис. 2, в) смены тенденции не выявлено.

На станциях Диксон и Амдерма выделены два периода с различными тенденциями повторяемости экстремальных скоростей ветра. Для станции Диксон на исследуемом ряду выделяется период 1977–1999 гг., когда повторяемость усиления ветра снижалась, но с 2000 г. повторяемость ветров со скоростью от 25 м/с и более начала возрастать. В районе Амдермы выделены периоды 1977–1997 гг., когда повторяемость усиления ветра снижалась, и 1998–2022 гг., когда повторяемость штормовых ветров начала возрастать.

В табл. 2 представлены статистические характеристики выделенных периодов для этих станций в холодный период года с 1977 по 2022 гг.

В среднем повторяемость ветров со скоростью 25 м/с и более выше в первый из выделенных периодов. Более низкая средняя повторяемость во втором выделенном периоде на двух станциях может быть связана с увеличением разброса величины повторяемости на временном ряду, возрастанием неустойчивости и частой сменой характера синоптических условий, о чем косвенно свидетельствует возрастание дисперсии приблизительно после 2000 г. Однако при проверке по t-критерию Стьюдента при уровне значимости 0,05 не было обнару-

жено статистически значимых полиномиальных трендов в повторяемости штормовых ветров от 25 м/с и более в холодный период года (рис. 2, а, з).

В рамках исследования также проанализирована повторяемость усиления ветра за период 1991–2020 гг. (новая климатическая норма ВМО или современный климат). Результаты показали однонаправленную тенденцию к повышению повторяемости на станциях Диксон и Амдерма, расположенных в юго-западной части Карского моря и однонаправленную слаб выраженную тенденцию к понижению повторяемости усиления ветра на станциях, расположенных в северо-восточной части Карского моря в районе мысов Стерлегова и Челюскин. При проверке на статистическую значимость по t-критерию Стьюдента значимых положительных и отрицательных трендов не выявлено, коэффициент детерминации для линейного тренда, полученного для станции Диксон, принимает значение 0,09, для мыса Челюскин — 0,02, для мыса Стерлегова — 0,00, для Амдермы — 0,01.

Обсуждение полученных результатов и выводы

Для анализа повторяемости ОПЯ, связанных с усилением ветра, проведено исследование данных восьмисрочных наблюдений на четырёх метеорологических станциях, расположенных на побережье Карского моря. Эти данные позволили провести анализ усиления ветра от 25 м/с и более. Наибольшая повторяемость усиления ветра от 25 м/с и более на всех исследуемых станциях отмечается в зимний период с октября по март, в период активной циклонической деятельности. Результаты хорошо согласуются с данными, представленными в работе [12], где отмечается максимум скорости ветра в октябре–январе, минимум — в июле–августе.

Данные о смене тенденций в повторяемости ветров силой 25 м/с и более показали различные результаты для двух районов. Станции, расположенные в юго-западной части Карского моря, показали наличие смены тенденции на исследуемом вре-

менном ряду с 1977 по 2022 г., станции в северо-восточной части Карского моря показали отсутствие смены тенденции. Данное явление может быть связано с более сильным влиянием в юго-западной части Карского моря североатлантических циклонов, которые по мере продвижения на восток заполняются и становятся менее активными [13]. Также не исключено влияние полярных мезомасштабных циклонов, которые в большинстве случаев образуются в Западной Арктике [14], и по мере продвижения к Восточной Арктике повторяемость полярных мезомасштабных циклонов уменьшается.

По итогам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Наибольшая повторяемость ветров со скоростью 25 м/с и более отмечается в холодный период года — с октября по март. Самыми ветреными месяцами в районе станции Диксон и мыса Стерлегова являются январь и декабрь, в районах м. Челюскин и Амдермы — январь и февраль.

2. За исследуемый временной ряд с 1977 по 2022 г. в юго-западной части Карского моря на станциях Диксон и Амдерма наблюдается смена тенденции в повторяемости ветров со скоростью 25 м/с и более. В северо-восточной части Карского моря в районах м. Стерлегова и м. Челюскин смены тенденции в повторяемости усиления ветра не обнаружено.

3. В районе Диксона в период с 1977 по 1999 г. отмечается слабое падение повторяемости ветра со скоростью 25 м/с и более, с 2000 г. отмечается рост повторяемости и увеличение дисперсии ряда.

4. В районе Амдермы в период 1998–2022 гг. отмечается рост повторяемости ветра со скоростью 25 м/с, при этом дисперсия ряда увеличилась.

Таким образом, по результатам наших исследований усиление повторяемости скорости ветра до уровня ОПЯ в целом подтверждается для зимнего периода года. Однако выявленное повышение повторяемости для периода современных изменений климата (1991–2020 гг.) оказалось статистически не значимым. Возможно, это характерно только для станций, распо-

ложенных на юго-западном и юго-восточном побережьях Карского моря. Аналогичные исследования для других районов Карского моря (центральная часть акватории, северные районы) планируется выполнить с привлечением возможностей реанализов.

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 24-27-00112 «Современные изменения арктического климата и экстремальные колебания погоды в западном секторе Северного морского пути».

Литература

1. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб. : Научные технологии, 2022. 124 с.
2. *Gunnar S., Kwok R., Menemenlis D.* Trends in Arctic sea ice drift and role of wind forcing: 1992–2009 // *Geophys. Res. Lett.* 2011. Vol. 38, No. 19. L19501. DOI: 10.1029/2011GL048970
3. *Tilinina N., Gulev S., Bromwich D.* New view of Arctic cyclone activity from the Arctic system reanalysis // *Geophys. Res. Lett.* 2014. Vol. 43. P. 1766–1772. DOI: 10.1002/2013GL058924
4. *Smirnova J.E., Golubkin P.A., Bobylev L.P., Zabolotskikh E.V., Chapron B.* Polar low climatology over the Nordic and Barents seas based on satellite passive microwave data // *Geophys. Res. Lett.* 2015. Vol. 42, No. 13. P. 5603–5609. DOI: 10.1002/2015GL063865
5. Атлас Арктики / под ред. А.Ф. Трешникова. М. : Главное управление геодезии и картографии при совете министров СССР, 1985. 204 с.
6. Российская Арктика в XXI веке: природные условия и риски освоения. М. : Феория, 2013. 144 с.
7. Карское море. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т. 7. Л. : Гидрометеоиздат, 1986. 278 с.
8. *Мысленков С.А., Платонов В.С., Сильвестрова К.П., Добролюбов С.А.* Рост штормовой активности в Карском море с 1979 по 2019 г. по данным моделирования // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 498, № 2. С. 175–182.
9. *Суркова Г.В., Крылов А.А.* Синоптические ситуации, способствующие формированию экстремальных значений скорости ветра

- в Баренцевом море // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2016. № 6. С. 18–25.
10. *Shestakova A.A., Repina I.A.* Overview of strong winds on the coasts of the Russian Arctic seas // *Ecologica Montenegrina*. 2019. Vol. 25. Spec. Iss.: European Russian Seas. P. 14–25. DOI: 10.37828/em.2019.25.2
 11. *Брызгин Н.Н., Дементьев А.А.* Опасные метеорологические явления в Российской Арктике. СПб. : Гидрометеиздат, 1996. 156 с.
 12. Моря российской Арктики в современных климатических условиях / под общ. ред. И.М. Ашика. СПб. : ААНИИ, 2021. 360 с.
 13. *Угрюмов А.С., Лаврова И.В.* Основные закономерности общей циркуляции атмосферы : учебное пособие. СПб. : РГГМУ, 2021. 72 с.
 14. *Лопуха В.О., Федосеева Н.В.* Спутниковый сравнительный анализ активности полярных мезоциклонов в Баренцевом и Карском морях за 2017–2021 годы // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2022. № 682. С. 136–142.

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ЗИМНЕГО АЗИАТСКОГО АНТИЦИКЛОНА НА НИЖНЕЕ ПОВОЛЖЬЕ В РАЗЛИЧНЫЕ ПЕРИОДЫ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ

С.В. Морозова, Е.А. Полянская, **М.А. Алимпиева**

*ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», Саратов*

Рассматривается синоптический процесс влияния западной периферии зимнего азиатского антициклона на Нижнее Поволжье. Рассчитываются повторяемость, преемственность, продолжительность воздействия этого типа процесса, а также характеристики метеорологического режима при воздействии зимнего азиатского антициклона в период стабилизации и во вторую волну глобального потепления. Выявлены различия в состоянии этого объекта циркуляции в различные климатические периоды. Оценивается роль этого центра действия атмосферы в формировании аномалий термического режима в Нижнем Поволжье с различной вероятностью.

Ключевые слова: климатическая изменчивость, зимний азиатский антициклон, вторая волна глобального потепления, региональный климат

FEATURES OF THE INFLUENCE OF THE WINTER ASIAN ANTICLONE ON THE LOWER VOLGA REGION IN DIFFERENT PERIODS OF CLIMATE VARIABILITY

S.V. Morozova, E.A. Polyanskaya, **M.A. Alimpieva**

Saratov State University, Saratov

The synoptic process of the influence of the western periphery of the winter Asian anticyclone on the Lower Volga region is considered. The frequency, continuity, and duration of the impact of this type of process are calculated, as well as the characteristics of the meteorological regime under the influence of the winter Asian anticyclone during the stabilization period and the second wave of global warming. Differences in the state of this circulation object in different climatic periods are revealed. The role of this center of atmospheric action in the formation of thermal regime anomalies in the Lower Volga region with different probabilities is assessed.

Keywords: climate variability, winter Asian anticyclone, second wave of global warming, regional climate

Введение

Зимний азиатский антициклон — региональный центр действия атмосферы — формируется над обширными пространствами Азии и существует с сентября по май. Центр его в среднем многолетнем располагается над северо-западными районами Монголии, а отроги распространяются на северо-восток, достигая Чукотского полуострова, на восток Китая и далеко на запад, охватывая своим влиянием Нижнее и Среднее Поволжье, иногда достигая Украины [1]. На ежедневных картах погоды зимний азиатский антициклон может выглядеть так, что помимо основного центра существует еще один, который может быть расположен над Казахстаном, Поволжьем, центральной частью Европейской территории России (ЕТР), республикой Коми. Таким образом, зимний азиатский антициклон — это обширное барическое образование, оказывающее влияние на погоду очень больших территорий около восьми месяцев в году.

Механизм образования зимнего азиатского антициклона довольно сложен [2–4]. Подробное изложение причин его формирования приводится в [4]. Вкратце механизм формирования этого центра действия сводится к следующему: в связи с систематическим возникновением высотного гребня над Атлантикой регулярно возникает сопряженная с ним ложбина над Западной Европой. По мере развития европейской высотной ложбины в ее передней (восточной) части усиливается адвекция теплого воздуха на северо-восток, на Таймыр. Это, в свою очередь, приводит к формированию сопряженного уже с этой ложбиной высотного гребня, по восточной части которого осуществляется адвекция холода на районы центральной и восточной Сибири, что приводит к систематическому повышению наземного давления в этой области. Возникший у земной поверхности антициклон способствует радиационному охлаждению, что влечет за собой дальнейшее усиление антициклона. В образовании зимнего азиатского антициклона немаловажную роль играет и орографический фактор: изрезанность

рельефа территории с большим количеством отрицательных форм рельефа способствует застаиванию в них порций холодного воздуха и дополнительному выхолаживанию. Таким образом, Сибирский максимум возникает и поддерживается совокупностью циркуляционных, радиационных и местных орографических факторов.

Безусловно, такая мощная циркуляционная система, как зимний азиатский антициклон, не может не реагировать на климатические изменения, происходящие в Северном полушарии. Во многих публикациях рассматривается динамика зимнего азиатского антициклона на фоне климатической изменчивости, например, в [5–9]. Так, С.В. Морозова в статье [7] показала, что во вторую волну глобального потепления по сравнению с периодом стабилизации изменилась широта расположения его центра: центр стал располагаться севернее, но статистической значимости это изменение не показало. Статистически значимо изменилась интенсивность зимнего азиатского антициклона: во вторую волну глобального потепления этот барический максимум усилился по сравнению с периодом стабилизации.

Зимний азиатский антициклон как синоптический объект является термически неоднородным. Самой холодной является восточная его часть, по которой осуществляется постоянная адвекция очень холодных воздушных масс с восточного сектора Арктического бассейна. Западная периферия антициклона является относительно теплой. По ее периферии происходит адвекция воздушных масс с юга на север, а на высоте над этой частью антициклона чаще всего наблюдается барический гребень [4, 10]. Периодическое присутствие западной периферии зимнего азиатского антициклона над Нижним Поволжьем является характерной особенностью региона и одним из факторов, обуславливающих тенденцию к формированию над Нижним Поволжьем деформационного поля в нижней тропосфере [10].

В статье рассматриваются особенности воздействия на Нижнее Поволжье западной периферии зимнего азиатского

антициклона в различные периоды климатической изменчивости.

Материалы и методы

Известно, что развивающееся на планете потепление неоднородно. На фоне прогрессивного роста температур выделяются циклические колебания разной амплитуды и продолжительности. По характеру изменения приповерхностной температуры воздуха С.В. Морозова выделила естественные климатические периоды состояния земной климатической системы (ЗКС) [11–13]. На рис. 1 представлены естественные климатические периоды состояния ЗКС — окончание малого ледникового периода в Европе, первая волна глобального потепления, период стабилизации, вторая волна глобального потепления.

Настоящее исследование проводилось в два естественных климатических периода состояния ЗКС — периода стабилизации и второй волны глобального потепления (рис. 1). Выборки

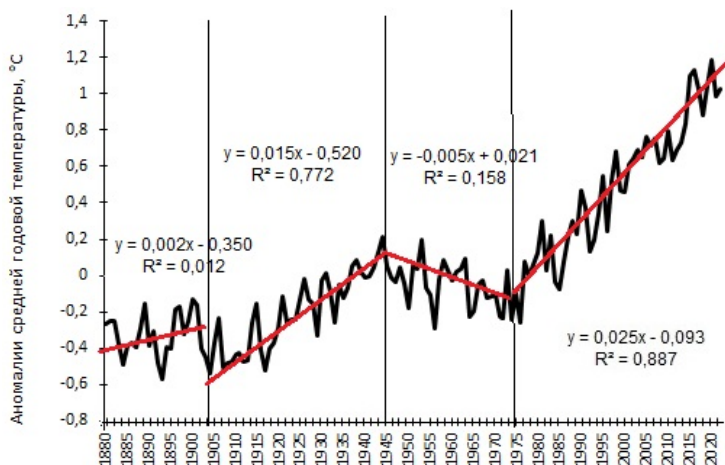


Рис. 1. Естественные климатические периоды состояния земной климатической системы (выделены по аномалиям приповерхностной температуры воздуха Северного полушария, сайт <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/#>) [11]

синоптического материала, необходимого для анализа, формировались на следующих временных промежутках: соответствующем периоду стабилизации с 1949 по 1969 г. и приходящемся на вторую волну глобального потепления с 1998 по 2014 г. Для этих двух временных промежутков рассматривались следующие статистические характеристики западной периферии зимнего азиатского антициклона: продолжительность, повторяемость, преемственность. Реперными пунктами стали города Самара, Саратов, Волгоград, Астрахань. Случаи влияния западной периферии зимнего азиатского антициклона в каждом пункте определялись по синоптическим картам за 00 ч ВСВ (всемирно скоординированное время). Тип синоптического процесса определялся в соответствии с региональной типизацией синоптических процессов В.Л. Архангельского [14] и Е.А. Полянской [10]:

- I — циклоническая деятельность на арктическом фронте;
- II — воздействие арктического антициклона;
- III — воздействие западной периферии зимнего азиатского антициклона;
- IV — воздействие субтропического антициклона;
- V — малоградиентное поле;
- VI — циклоническая деятельность на полярном фронте;
- VII — деформационное поле.

Статистический анализ влияния западной периферии зимнего азиатского антициклона заключался в расчете стандартных показателей — повторяемости, продолжительности воздействия, преемственности. Под продолжительностью понималось среднее число дней с этим процессом, повторяемость рассчитывалась как абсолютная частота. Преемственность анализировалась с помощью цепей Маркова [15]. В качестве состояния взят тип синоптического процесса, и посредством простой цепи Маркова решалась задача нахождения вероятностей перехода одного синоптического процесса в другой.

Известно, что западной периферии зимнего азиатского антициклона не соответствует какой-либо определенный тип

погоды [16]. Для выявления синоптических особенностей проявления западной периферии этого сезонного центра действия атмосферы при различных погодных условиях использовался метод эталонов. Этот метод довольно успешно применялся для распознавания синоптических условий формирования волн тепла и холода в различных регионах [17, 18].

Суть метода эталонов заключается в определении такого поля, которое наилучшим образом характеризует все поля класса (выборки). Для определения эталонного поля используется евклидова метрика, по которой оценивается расстояние между полями класса (формула (1)). За эталон принимается то поле, расстояние от которого до всех остальных полей наименьшее:

$$d(A, B) = \sqrt{\sum_{l=1}^n (a(l) - b(l))^2}, \quad (1)$$

где d — расстояние между гидрометеорологическими полями; $a(l)$ и $b(l)$ — значения метеовеличин в l -м узле регулярной сетки сравниваемых полей.

Цифровые аналоги гидрометеорологических полей были получены из данных реанализа NCEP/NCAR. Выбирались значения геопотенциала изобарической поверхности H_0 . Географическим пространством послужила территория, ограниченная 35° и 70° с.ш. и 0° и 90° в.д. Расчеты проводились по программе STATISTICA.

Результаты исследования

В соответствии с проведенными расчетами составлены сводные табл. 1 и 2, в которых представлены некоторые статистические характеристики присутствия западной периферии зимнего азиатского антициклона над регионом.

Как видно из табл. 1, во все сезоны во всех пунктах продолжительность воздействия западной периферии зимнего азиатского антициклона от периода стабилизации ко второй волне глобального потепления уменьшается, причем существенно,

Таблица 1

Продолжительность (дни) воздействия зимнего азиатского антициклона на Нижнее Поволжье

Месяц, сезон	Самара		Саратов		Волгоград		Астрахань	
	СТ	ВВП	СТ	ВВП	СТ	ВВП	СТ	ВВП
Декабрь	8,6	5,8	6,1	5,3	5,4	5,2	5,7	5,9
Январь	7,1	6,4	6,4	5,8	5,5	5,5	5,9	5,7
Февраль	6,6	5,8	8,1	4,6	6,6	4,1	7,2	4,6
Зима (Σ)	22,3	18,0	20,6	15,7	17,5	14,8	15,7	16,2
Март	5,2	3,2	5,0	2,5	4,2	2,3	4,3	2,4
Апрель	4,2	1,1	3,6	0,8	3,4	0,7	3,5	0,6
Май	0,9	—	1,0	—	1,0	—	0,9	—
Весна (Σ)	10,3	4,3	9,6	3,3	8,6	3,0	8,7	2,8
Сентябрь	0,1	0,4	0,1	0,4	0,1	0,4	0,2	0,4
Октябрь	2,1	1,6	2,2	1,3	2,3	1,3	2,4	1,8
Ноябрь	6,1	3,1	2,8	2,9	5,4	2,6	5,5	2,4
Осень (Σ)	8,3	5,1	5,1	4,6	7,8	4,3	8,1	4,6
Год (Σ)	40,9	27,4	35,3	23,6	33,9	22,1	32,5	23,6

Примечание. Здесь и в дальнейшем сокращение СТ обозначает период стабилизации, ВВП — вторая волна глобального потепления.

примерно на треть. Исключением является самая южная часть Нижнего Поволжья (п. Астрахань), где зимой повторяемость воздействия западной периферии зимнего азиатского антициклона несколько больше во вторую волну глобального потепления, чем в период стабилизации. Это обстоятельство отчасти можно объяснить тем, что во вторую волну глобального потепления повышение зимних температур на ЕТР связано с усилением циклонической деятельности, особенно на арктическом фронте. Циклоны, смещаясь по ветке арктического фронта, часто затрагивают своей южной частью северную и центральную части Нижнего Поволжья (Самара–Волгоград) и не распространяют свое влияние на южную часть Нижнего Поволжья (Астрахань). В период стабилизации относительно

Таблица 2

**Повторяемость (число случаев) воздействия зимнего
азиатского антициклона на Нижнее Поволжье**

Месяц, сезон	Самара		Саратов		Волгоград		Астрахань	
	СТ	ВВП	СТ	ВВП	СТ	ВВП	СТ	ВВП
Декабрь	2,5	1,7	2,3	1,7	2,4	1,7	2,3	1,8
Январь	2,1	1,8	1,8	1,7	1,9	1,7	2,1	1,6
Февраль	1,6	1,6	1,8	1,4	1,8	1,5	1,9	1,4
Зима (Σ)	6,2	5,1	5,9	4,8	6,1	4,9	6,3	4,8
Март	1,6	1,1	1,8	0,8	1,4	0,8	1,6	0,9
Апрель	1,0	0,6	0,9	0,6	0,9	0,4	1,0	0,4
Май	0,4	–	0,4		0,3	–	0,3	–
Весна (Σ)	3,0	1,7	3,1	1,4	2,6	1,2	2,9	1,3
Сентябрь	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,2	0,2	0,2
Октябрь	0,9	0,5	0,9	0,6	0,9	0,5	0,9	0,6
Ноябрь	1,9	1,1	1,8	1,0	1,7	0,9	1,8	1,0
Осень (Σ)	3,0	1,8	2,9	1,8	3,0	1,6	2,9	1,8
Год (Σ)	12,2	8,6	11,9	8,0	11,7	7,8	12,1	7,9

высокий температурный фон формировался в результате циклонической деятельности на полярном фронте [12, 19].

В табл. 2 приведена повторяемость присутствия западной периферии зимнего азиатского антициклона по пунктам. По данным табл. 2 можно заключить, что число случаев воздействия западной периферии зимнего азиатского антициклона также снижается от периода стабилизации ко второй волне глобального потепления. Уменьшение числа случаев воздействия западной периферии зимнего азиатского антициклона на регион можно объяснить конфигурацией тела антициклона (рис. 2). На этом рисунке представлено среднее многолетнее поле давления воздуха на уровне моря во втором естественном синоптическом районе во вторую волну глобального потепления. Как видно из рисунка, основной отрог Сибирского максимума направлен на северо-восток России, в район Восточно-

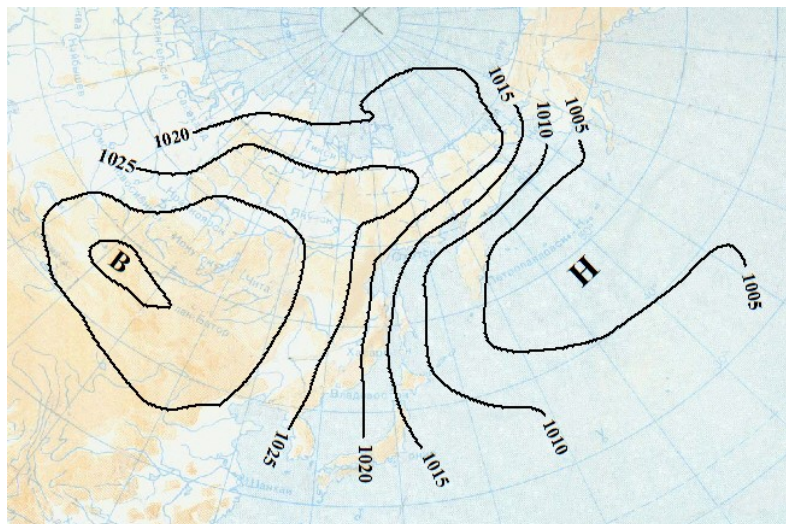


Рис. 2. Поле приземного давления во втором естественном синоптическом районе во вторую волну глобального потепления (1975–2015 гг.), январь

Сибирского и Чукотского морей. Если сравнить этот рисунок с рисунком поля давления, характерного для периода стабилизации [1], то можно заметить, что изобара 1020 гПа в период стабилизации проходит по побережью северных морей восточного сектора Арктики, а во вторую волну глобального потепления северо-восточный отрог антициклона сместился далеко на акваторию северных морей, то есть тело антициклона перетекло в северо-восточном направлении. Такое восточное расположение отрога антициклона обусловило очень низкие температуры воздуха во вторую волну глобального потепления. Об отсутствии потепления на побережье и акватории Восточно-Сибирского и Чукотского морей во вторую волну глобального потепления указывала Н.К. Кононова [20].

В табл. 3 представлены вероятности (в %) переходов каждого имеющегося в классификации типа синоптического процесса в III тип и переход III типа процесса во все остальные в различные естественные климатические периоды состояния ЗКС для зимних месяцев. Укажем, что данные приведены

Таблица 3

**Вероятность (%) перехода синоптических процессов
для зимы (по г. Саратову)**

Тип про- цесса	Вероятность (%) перехода синоптических процессов в III тип						Вероятность (%) перехода III типа синоптического процесса в остальные					
	Декабрь		Январь		Февраль		Декабрь		Январь		Февраль	
	СТ	ВВП	СТ	ВВП	СТ	ВВП	СТ	ВВП	СТ	ВВП	СТ	ВВП
I	6	7	3	6	5	5	10	11	7	11	7	11
II	9	19	12	17	13	12	2	3	5	5	4	4
IV	18	13	8	13	5	22	–	–	1	–	–	2
V	–	–	–	–	–	–	1	3	1	1	–	2
VI	24	10	6	4	6	5	15	6	12	3	6	11
VII	15	8	–	11	14	–	2	3	4	1	7	–

только для одного пункта (г. Саратова) и вероятности перехода синоптического процесса «сам в себя» (III в III) исключены из рассмотрения.

По данным табл. 3 можно заключить, что западная периферия зимнего азиатского антициклона никогда не устанавливается после малоградиентных полей (V тип). Переход III типа в V является запрещенным, причем в оба естественных климатических периода состояния ЗКС.

Также зимой в оба климатических периода западная периферия зимнего азиатского антициклона устанавливается довольно часто после арктических вторжений. Это объясняется тем, что при арктических вторжениях происходит подпитка западной периферии зимнего азиатского антициклона, и она регенерирует, а также расширяется площадь охвата ею территории. Следует отметить, что в декабре в период стабилизации западная периферия зимнего азиатского антициклона чаще всего устанавливалась после полярнофронтовых циклонов, а в феврале — после деформационных полей.

Довольно редко западная периферия зимнего азиатского антициклона наблюдается после арктическофронтовых циклонов, причем в оба естественных климатических периода. Это также очевидно, поскольку в тыл циклонам, развивающимся на арктическом фронте, закачивается холодный арктический воздух, часто оформляющийся в самостоятельные ядра, которые уже потом вливаются в западную периферию зимнего азиатского антициклона, усиливая ее.

Оказывается интересным, что в январе и феврале во вторую волну глобального потепления III тип процесса устанавливается после распространения восточного отрога субтропических антициклонов на Нижнее Поволжье. Сам факт распространения отрогов субтропических максимумов на Нижнее Поволжье зимой редок, однако во вторую волну глобального потепления возрастает число случаев воздействия их на Нижнее Поволжье, особенно на его южную часть [21]. Под влиянием субтропических антициклонов в Нижнем Поволжье формируется оттепельная погода, что является одной из причин регионального роста зимних температур во вторую волну глобального потепления [12, 21].

Анализ табл. 3 также позволил заключить, что западная периферия зимнего азиатского антициклона в оба естественных климатических периода наиболее часто сменяется циклонической деятельностью на арктическом и полярном фронтах. Практически запрещенным является ее переход в IV тип процесса, то есть после западной периферии невозможно распространение восточных отрогов субтропических максимумов на Нижнюю Волгу, а также формирование малоградиентных полей над регионом.

В январе и феврале переход западной периферии зимнего азиатского антициклона в циклоническую деятельность на арктическом фронте почти в два раза чаще, чем в период стабилизации. Также отметим, что в декабре и январе в период стабилизации западная периферия сменялась циклонической деятельностью на полярном фронте в несколько раз чаще, чем

во вторую волну глобального потепления. Укажем, что этот результат хорошо согласуется с выводами об увеличении повторяемости циклонов, сформировавшихся на арктическом фронте, и снижении повторяемости полярнофронтовых циклонов во вторую волну глобального потепления по сравнению с периодом стабилизации [12, 21].

Как уже указывалось, преобладающих условий погоды, складывающихся при западной периферии зимнего азиатского антициклона, не выявлено [16]. В табл. 4 представлены температуры воздуха у земной поверхности, вычисленные как средние многолетние из средних суточных температур воздуха во время воздействия этого типа процесса.

В соответствии с общегеографическими закономерностями (табл. 4), температуры при влиянии западной периферии зимнего азиатского антициклона повышаются от северных районов к южным. При переходе от периода стабилизации

Таблица 4

**Средние температуры воздуха при воздействии зимнего
азиатского антициклона на Нижнее Поволжье**

Месяц, сезон	Самара		Саратов		Волгоград		Астрахань	
	СТ	ВВП	СТ	ВВП	СТ	ВВП	СТ	ВВП
Декабрь	-12,1	-7,3	-10,7	-5,3	-8,5	-3,0	-7,4	-1,0
Январь	-13,1	-9,4	-12,2	-7,5	-9,4	-6,2	-6,5	-4,2
Февраль	-12,9	-9,5	-12,0	-7,7	-9,5	-5,3	-6,0	-2,9
Зима	-12,7	-8,9	-11,6	-6,8	-9,1	-4,9	-4,2	-2,6
Март	-3,9	-2,7	-2,8	-1,0	-0,1	1,7	1,5	3,9
Апрель	6,8	7,3	7,9	8,5	8,4	10,2	9,5	11,0
Май	11,1	—	13,8	—	15,2	—	17,9	—
Весна	4,6	2,3	6,3	3,0	7,8	4,3	9,6	6,1
Сентябрь	11,3	13,7	12,4	14,7	14,1	16,7	15,8	17,6
Октябрь	6,4	6,8	9,1	8,9	9,9	9,0	10,3	11,1
Ноябрь	-10,0	-7,8	-2,2	-0,3	-0,2	1,1	0,8	3,4
Осень	2,7	2,4	6,4	7,8	7,9	5,8	9,0	7,8

ко второй волне глобального потепления температуры во все сезоны года становятся выше, что отражает факт глобального потепления. Таким образом, в данном типе синоптического процесса (III тип) проявилось общепланетарное повышение температуры воздуха у земной поверхности.

Укажем, что диапазон температур, складывающихся под влиянием западной периферии зимнего азиатского антициклона, довольно большой. На рис. 3 представлены гистограммы повторяемости средних суточных температур при этом процессе за период с 1998 по 2014 г., соответствующий второй волне глобального потепления.

Как видно из рис. 3, во все зимние месяцы преобладающий фон температур при западной периферии зимнего азиатского антициклона от -10 до -5 °C. За выбранный временной интервал в феврале средние суточные температуры не опускались ниже -15 °C. Наиболее вероятны самые высокие температуры (от -5 до 0 °C) в декабре.

Для выявления особенностей западной периферии зимнего азиатского антициклона, с использованием метода эталонов составлены выборки дней (даты) с наиболее низкими и наиболее высокими значениями средней суточной температуры.

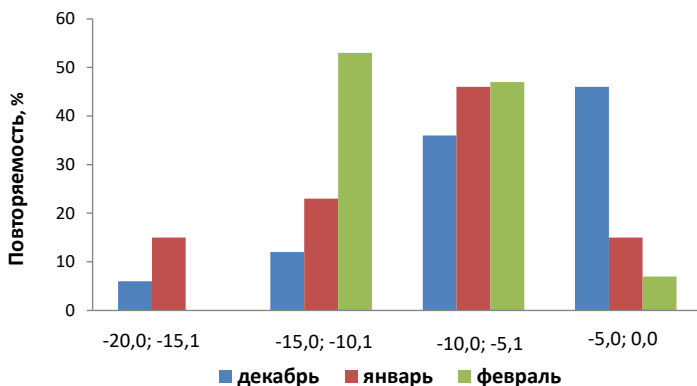


Рис. 3. Повторяемость различных градаций температур при воздействии западной периферии зимнего азиатского антициклона на Нижнее Поволжье (по г. Саратову)

В соответствии с выбранными датами составлялись матрицы полей давления, которые впоследствии тестировались на эталон по евклидовой метрике.

В соответствии с процедурой выделения эталонного поля для случаев формирования наиболее высоких температур самым типичным (эталонным) стало поле за 01.01.2006 г. (рис. 4), для случаев наиболее низких температур — за 05.01.2006 г. (рис. 5).

Процесс формирования наиболее низких температур при воздействии зимнего азиатского антициклона хорошо отражает процесс, представленный эталонным полем давления за 1 января 2006 г. На рис. 4 видно, что все Нижнее Поволжье находится под влиянием западной периферии зимнего азиатского антициклона, причем температуры за 00 ч по ВСВ довольно высоки для января. Так, в Самаре ночные температуры составили $-4,2^{\circ}\text{C}$, в Саратове $-5,6^{\circ}\text{C}$, в Волгограде $-3,1^{\circ}\text{C}$,

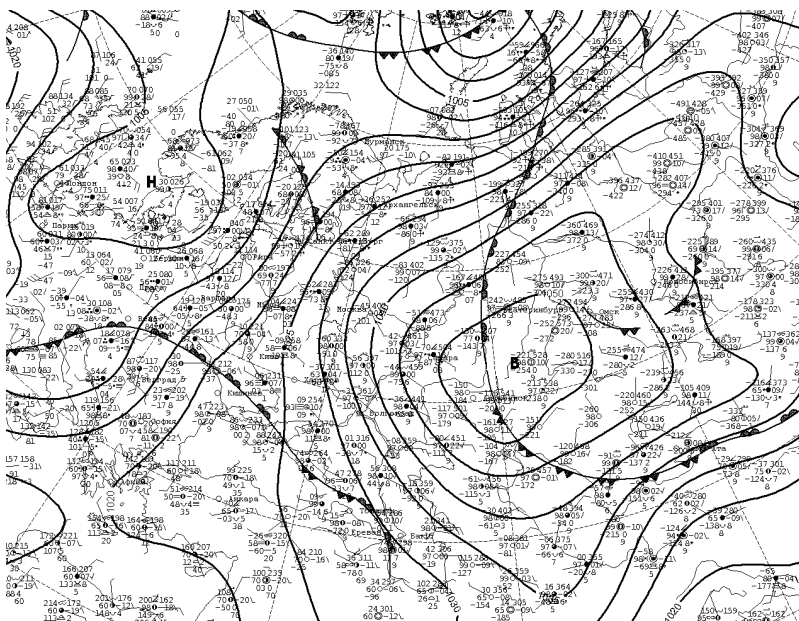


Рис. 4. Фрагмент приземной карты 1 января 2006 г. (00 ч ВСВ)

в Астрахани $+0,1^{\circ}\text{C}$. На рис. 5 можно увидеть, что над западной периферией зимнего азиатского антициклона располагается хорошо развитый барический гребень, по западной периферии которого осуществляется мощная адвекция воздушных масс с юга. Сам зимний азиатский антициклон довольно сильно смещен к западу, и его основной центр располагается над Казахстаном.

Совершенно по-другому выглядит западная периферия зимнего азиатского антициклона в тех случаях, когда под ее воздействием формируется довольно низкий температурный режим. Этот процесс хорошо отражает эталонное поле за 5 января 2006 г. (рис. 6). Так, в отличие от предыдущего поля (рис. 5), западная периферия вытянута далеко на северо-запад. Гребень антициклона довольно узок, ночная температура в Самаре, находящейся на оси этого гребня, составила $-23,5^{\circ}\text{C}$, в Саратове, расположенном южнее оси гребня, $-17,7^{\circ}\text{C}$. В Астрахани и Волгограде, находящихся в южной части этого отрога, в юго-восточных потоках, теплее. В Волгограде ночью было $-9,9^{\circ}\text{C}$, в Астрахани $-4,5^{\circ}\text{C}$. Существенные различия заметны и поле геопотенциала на среднем уровне тропосферы (рис. 7) — над Нижним Поволжьем расположена холодная высотная ложбина. Таким образом, характер температурного режима западной периферии зимнего азиатского антициклона определяется не столько характером барического поля у земной поверхности, сколько характером высотного барического поля средней тропосферы.

Безусловно, такое мощное барическое образование, как Сибирский максимум, не может не оказывать влияния на погоду близлежащих регионов, причем как в синхронном, так и в асинхронном плане. В табл. 5 представлена вероятность формирования положительных и отрицательных аномалий средних месячных температур в Нижнем Поволжье при различных смещениях его центра и изменения его интенсивности.

Как видно из табл. 5, положительные средние месячные аномалии температуры формируются при юго-восточном

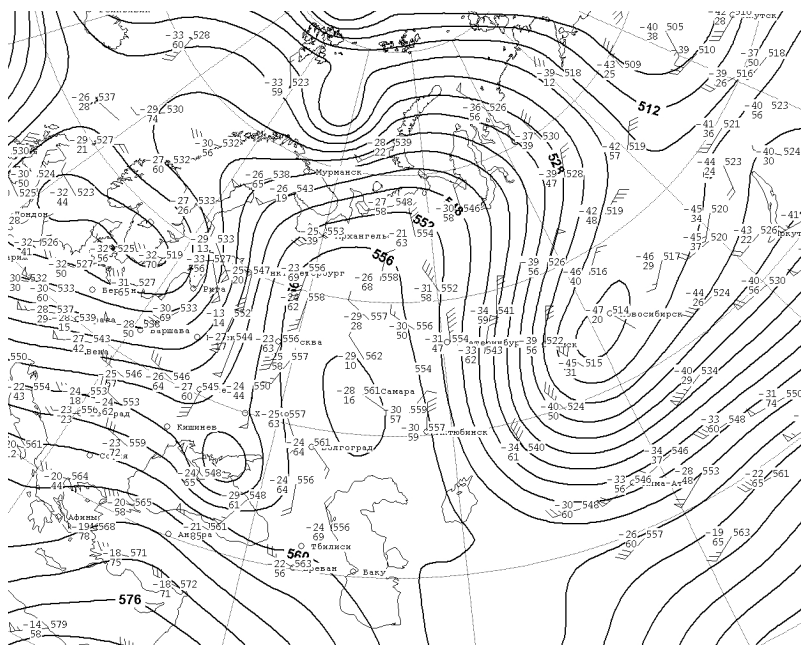


Рис. 5. Фрагмент поля геопотенциала изобарической поверхности
АТ-500 гПа за 1 января 2006 г. (00 ч ВСВ)

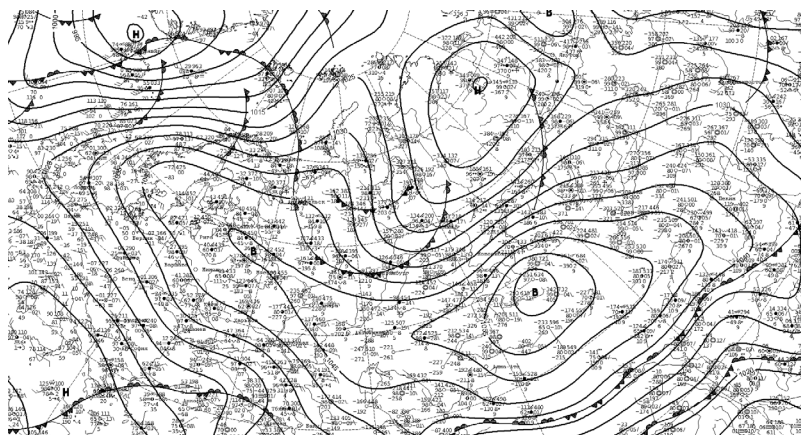


Рис. 6. Фрагмент приземной карты 5 января 2006 г. (00 ч ВСВ)

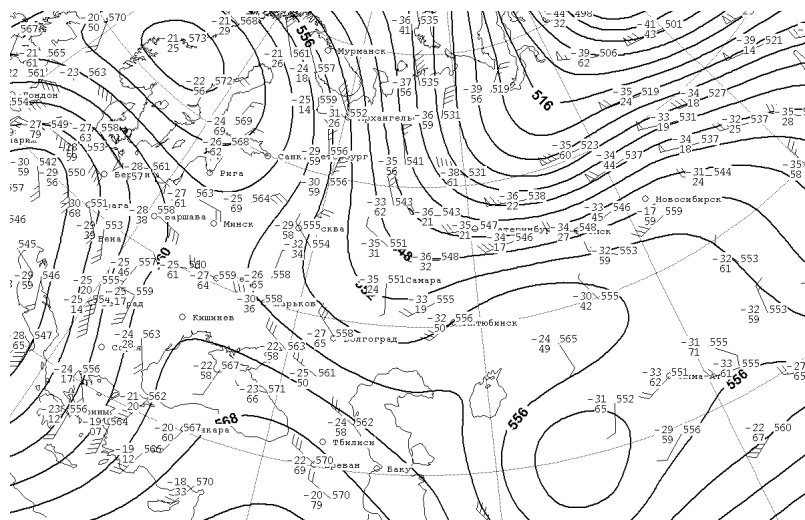


Рис. 7. Фрагмент поля геопотенциала изобарической поверхности
AT-500 гПа за 5 января 2006 г. (00 ч ВСВ)

смещении его центра от среднего многолетнего. Отрицательные средние месячные аномалии температуры имеют место при северо-западном смещении его центра. Объяснить эту зависимость несложно, если учесть, что положительные температурные аномалии зимой формируются в результате активной циклонической деятельности, и юго-восточное смещение центра (предполагаем, что и всего тела антициклона) приводит к прохождению через Нижнее Поволжье циклонических образований. Наоборот, при северо-западном смещении антициклона он распространяет область своего влияния на Нижнее Поволжье и стимулирует процесс вхождения свежих арктических ядер в его западную периферию, что приводит к формированию морозной погоды в регионе.

Оказывается интересным, что в феврале, наоборот, западное смещение центра антициклона с очень большой вероятностью (80 %) способствует формированию положительных аномалий температуры, а восточное с вероятностью 77 % — формированию отрицательных аномалий. В данном случае

Таблица 5

**Характеристики зимнего Азиатского антициклона в аномально
тёплые и аномально холодные месяцы в Нижнем Поволжье**

Ме- сяц	Характеристика термического режима	Смещение по меридиану $\Delta\varphi$			Смещение по параллели $\Delta\lambda$			Изменение давления Δp , гПа	
		На- прав- ление	Зна- че- ние	Ве- роят- ность, %	На- прав- ление	Зна- че- ние	Ве- роят- ность, %	Зна- че- ние	Ве- роят- ность, %
Ян- варь	$+\Delta t$	Ю	3°	100°	В	3°	100°	—	—
	$-\Delta t$	С	1,5°	78°	З	2°	72°	—	—
Фев- раль	$+\Delta t$	—	—	—	З	3°	80°	—	—
	$-\Delta t$	—	—	—	В	8°	77°	—	—
Ок- тябрь	$+\Delta t$	—	—	—	В	5°	80°	—	—
	$-\Delta t$	—	—	—	З	7°	90°	—	—
Но- ябрь	$+\Delta t$	—	—	—	—	—	—	5	60
	$-\Delta t$	—	—	—	—	—	—	–5	46
Де- кабрь	$+\Delta t$	—	—	—	—	—	—	4	75
	$-\Delta t$	—	—	—	—	—	—	–7	60

Примечание. $+\Delta t$ — положительная аномалия температуры; $-\Delta t$ — отрица-
тельная аномалия температуры.

формирование положительных аномалий температуры при западном смещении центра Сибирского максимума подчеркивает одну из циркуляционных особенностей региона: в феврале интенсивные волны тепла очень часто формируются при процессе стационарирования теплых фронтов вдоль западной периферии зимнего азиатского антициклона.

Синоптический анализ типичного поля, выявленного методом эталонов, позволил установить, что при восточном смещении центра антициклона часто наблюдается растекание его тела вдоль оси запад-восток, и тогда Нижнее Поволжье оказывается под влиянием его западной периферии, что способствует вхождению арктических ядер в нее. Необходимым условием растекания тела Сибирского максимума в направлении широтных кругов является активная циклоническая деятельность

над северными районами Евразии с образованием обширных по площади депрессий.

Изменение интенсивности (мощности) Сибирского антициклона влияет на установление теплых или холодных режимов в Нижнем Поволжье осенью, в то время, когда Сибирский максимум формируется и «набирает» силу. Весьма вероятно, что именно это свойство антициклона является с определенной вероятностью ответственным за формирование температурного фона соответствующего месяца.

Также отметим, что изменения географического положения центра антициклона и его мощности включаются в расчеты статистических схем долгосрочных прогнозов большой заблаговременности по механизму асинхронных связей [22–26].

Заключение

В результате проделанной работы можно сформулировать следующие выводы:

1. Продолжительность воздействия зимнего азиатского антициклона на Нижнее Поволжье и его повторяемость сократились во вторую волну глобального потепления по сравнению с периодом стабилизации.

2. В два естественных климатических периода западная периферия зимнего азиатского антициклона чаще всего наблюдается после вторжения арктических ядер и сменяется циклонической деятельностью на арктическом и полярном фронтах; после западной периферии зимнего азиатского антициклона никогда не устанавливаются малоградиентные поля.

3. В январе и феврале западная периферия зимнего азиатского антициклона во вторую волну глобального потепления почти в два раза чаще, чем в период стабилизации, сменяется циклонической деятельностью на арктическом фронте. В декабре и январе западная периферия зимнего азиатского антициклона во вторую волну глобального потепления гораздо реже, чем в период стабилизации, сменяется циклонической деятельностью на полярном фронте.

4. Температурный режим в Нижнем Поволжье во вторую волну глобального потепления в условиях III типа синоптического процесса несколько выше, чем в период стабилизации, что отражает факт глобального потепления.

5. Зимний азиатский антициклон по принципу синхронной связи участвует в формировании положительных/отрицательных аномалий средней месячной температуры воздуха в Нижнем Поволжье с различной вероятностью.

Литература

1. Гирс А.А. Основы долгосрочных прогнозов погоды. Л. : Гидрометеиздат, 1960. 560 с.
2. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Часть III. Вып. 4. Синоптические процессы и прогноз погоды в восточных районах СССР. Л. : Гидрометеиздат, 1965. 216 с.
3. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Часть II. Вып. 5. Дальний Восток. Л. : Гидрометеиздат, 1988. 176 с.
4. Полянская Е.А. Синоптические процессы Восточной Сибири и Дальнего Востока. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2011. 56 с.
5. Мохов И.И., Хон В.Ч. Межгодовая изменчивость и долгопериодные тенденции центров действия атмосферы в северном полушарии. Анализ данных наблюдений // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41, № 6. С. 723–732.
6. Неушкин А.И., Сидоренков Н.С., Санина А.Т., Иванова Т.Б., Бережная Т.В., Панкратенко Н.В., Макарова М.Е. Мониторинг общей циркуляции атмосферы. Северное полушарие. Обнинск : Изд-во ВНИГМИМЦД, 2013. 200 с.
7. Морозова С.В. Характеристика зимнего Азиатского антициклона на фоне настоящих климатических изменений // Известия Алтайского отделения РГО. 2014. Вып. 35. С. 55–58.
8. Морозова С.В., Полянская Е.А., Алимбиева М.А. Динамика зимнего азиатского антициклона на фоне настоящих климатических изменений // Гидрометеорология и образование. 2020. № 4. С. 30–38.
9. Мохов И.И., Чернокульский А.В., Осипов А.М. Центры действия атмосферы Северного и Южного полушарий: особенности и изменчивость // Метеорология и гидрология. 2020. № 11. С. 5–23.
10. Полянская Е.А. Синоптические процессы и явления погоды в Нижнем Поволжье. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та. 1986. 208 с.

11. *Морозова С.В.* Роль планетарных объектов циркуляции в глобальных климатических процессах. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та. 2019. 132 с.
12. *Morozova S.V., Polyanskaya E.A., Ivanova G.F., Levitskaya N.G., Denisov K.E., Molchanova N.P.* Variability of the circulation processes in the Lower Volga Region on the background of global climate trends // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2018. Vol. 107. P. 01203. DOI: 10.1088/1755-1315/107/1/01203713
13. *Морозова С.В., Полянская Е.А., Алимбиева М.А.* Особенности межгодовой изменчивости приповерхностной температуры воздуха Северного и Южного полушарий по данным архива Had-CRUT5 // Гидрометеорология и экология. 2023. № 72. С. 420–431.
14. *Архангельский В.Л.* Региональная синоптика Нижнего Поволжья. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1968. 208 с.
15. *Малинин В.Н.* Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб. : Изд-во РГГМУ, 2008. 408 с.
16. *Лапина С.Н., Мартазинова В.Ф.* Аэросиноптическая характеристика западного отрога зимнего азиатского антициклона над Нижним Поволжьем // Вопросы климата и погоды Нижнего Поволжья. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1971. Вып. 7. С. 88–95.
17. *Морозова С.В.* Исследование синоптических процессов методом эталонов. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2013. 164 с.
18. *Морозова С.В.* Прогноз волн тепла и холода для Саратовской области с использованием физико-статистического метода В.Ф. Мартазиновой «плавающий аналог» // Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. Вып. 363. Гидрометеорологические прогнозы. М., 2017. С. 138–159.
19. *Морозова С.В., Лапина С.Н., Полянская Е.А., Алимбиева М.А.* Синоптические условия формирования сухих и влажных волн тепла и холода на Средней Волге // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2023. № 2 (388). С. 77–92.
20. *Морозова С.В., Полянская Е.А.* Особенности циркуляционных процессов в Нижнем Поволжье зимой // Известия Саратовского университета. Сер. Науки о Земле. 2012. Т. 12, вып. 1. С. 14–16. EDN TBRXOZ
21. *Кононова Н.К.* Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л. Дзержевскому. М. : Воентехиниздат, 2009. 370 с.
22. *Морозова С.В., Полянская Е.А., Алимбиева М.А.* Исследование синоптических процессов на юго-востоке Русской равнины

- в различные климатические периоды // Гидрометеорология и образование. 2021. № 2. С. 47–55.
23. *Алимпиева М.А., Морозова С.В.* Долгосрочный прогноз типов весен на примере Саратовской области // Метеорология и гидрология. 2019. № 7. С. 92–100.
24. *Нго Ван Туен, Куликова Л.А.* Режим увлажнения и долгосрочный прогноз осадков в Северном Вьетнаме // Ученые записки РГТМУ. 2014. № 37. С. 67–71.
25. *Morozova S.V., Alimpieva M.A.* On the possibility of long-term forecasting of seasonal hydrometeorological phenomena // Environmental Dynamics and Global Climate Change. 2020. Vol. 11, No. 2. P. 73–78. DOI: 10.17816/edgcc19010
26. *Морозова С.В., Алимпиева М.А.* Физико-статистическая модель долгосрочного прогноза весенних дат перехода средней суточной температуры через 10 °С // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 3 (369). С. 46–61.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ «СУРОВОСТИ» ЗИМ/ «КОМФОРТНОСТИ» ЛЕТНИХ МЕСЯЦЕВ В РЕГИОНЕ КАРСКОГО МОРЯ

Т.К. Карандашева¹, Б.В. Иванов^{1,2}, А.Д. Ревина¹

¹ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург

² Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург

Для характеристики температурного режима зимних или летних сезонов года традиционно используются величины, представляющие собой сумму отрицательных/положительных температур воздуха за определенный период или сумму градусодней мороза/тепла, т.е. показатели «суровости» зим и «комфортности» лета. В данной работе сделана попытка оценить пространственно-временные тенденции показателей суровости/комфортности температурного режима приземной атмосферы региона Карского моря в условиях современного потепления климата. Для периода современной климатической нормы 1991–2020 гг. определены периоды, когда среднемесячные суммы градусодней отрицательны на всей акватории (октябрь–май), положительны (июль–август), и переходные интервалы (июнь, сентябрь), когда в северной части региона суммы градусодней отрицательны, а на остальной акватории положительны. Для выявленных временных интервалов определены статистически значимые положительные тенденции изменения сумм градусодней. Скорость снижения «суровости» зимы (октябрь–май) растет в направлении с юга на север. Наибольшие скорости повышения «комфортности» лета (июнь–август) наблюдаются на юго-востоке и в сентябре — на северо-востоке региона. Проведено сравнение выявленных режимов со статистически значимыми отрицательными трендами ледовитости в Карском море. В период октябрь–май здесь наблюдаются тренды ледовитости в пределах от $-0,5$ до $-1,0$ %/год. В июне многолетний процесс снижения ледовитости усиливается на юго-западе, в июле–августе распространяется на северо-восток, в сентябре значительные скорости изменения ледовитости (-2 до -3 %/год) сохраняются на севере региона.

Ключевые слова: Карское море, тенденции суровости зим, тенденции комфортности лета

TRENDS IN THE WINTER SEASON' SEVERITY AND SUMMER MONTHS' COMFORTABILITY IN THE KARA SEA REGION

T.K. Karandasheva¹, B.V. Ivanov^{1,2}, A.D. Revina¹

¹ *Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg*

² *Saint Petersburg State University, Saint Petersburg*

To characterize the temperature regime of winter or summer seasons of the year, the sum of negative/positive air temperatures for a certain period or the sum of degree-days of frost/heat, i.e. indicators of the severity of winters and the comfortability of summers, is traditionally used. In this paper, an attempt was made to assess the spatio-temporal trends in the severity/comfortability indicators of the temperature regime of the surface atmosphere of the Kara Sea region under the conditions of modern global warming. For the period of the modern climatic norm of 1991–2020, the periods were determined when the average monthly sums of degree-days are negative throughout the entire water area (October–May) and positive (July–August), and transitional intervals (June, September), when the sums of degree-days in the northern part of the region are negative, and in the rest of the water area they are positive. For the identified time intervals, statistically significant positive trends in the change in the sums of degree-days were determined. The rate of decrease in winter severity (October–May) increases in the direction from south to north. The highest rates of increase in summer comfortability (June–August) are observed in the southeast, and in September—in the northeast of the region. A comparison of the identified regimes with statistically significant negative trends in ice coverage in the Kara Sea was carried out. In the period of October–May, the ice coverage trends are observed here within the range of -0.5 to -1.0 %/year. In June, the long-term process of ice coverage decrease intensifies in the southwest, in July–August it spreads to the northeast, in September significant rates of ice coverage change (-2 to -3 %/year) persist in the north of the region.

Keywords: Kara Sea, winter severity trends, summer comfort trends

Введение

Ледовитость морей напрямую зависит от суровости зим. Для характеристики температурного режима зим (мягких, умеренных, суровых) традиционно применяется сумма градусо-дней мороза (СГДМ). По мнению Н.Н. Зубова [1], первые систематические наблюдения за ростом морского льда в зависи-

мости от температуры воздуха произвел австрийский ученый Карл Вайпрехт во время зимовки его экспедиции на Земле Франца-Иосифа (1873–1874 гг.). По результатам этих наблюдений было выявлено оригинальное соотношение между суммой среднесуточных отрицательных температур воздуха и толщиной образовавшегося льда [2]. В дальнейшем Н.Н. Зубовым [1] был теоретически обоснован процесс роста льда за счет СГДМ, с учетом его теплопроводности, теплоемкости и плотности.

СГДМ не только является определяющим фактором для оценки толщины льда в зимний период, но и опосредованно влияет на площадь морского льда в летний период. При меньшей максимальной толщине льда в конце зимнего сезона летнее сокращение его площади будет происходить быстрее при прочих равных условиях. В работе [3] показано, что в Карском море СГДМ за ноябрь–апрель, рассчитанные по данным 7 метеорологических станций (МС), и площади льда (тыс. км²) в августе связаны между собой. Так, для периода 1980–2016 гг. коэффициент корреляции составил $-0,76$.

Способ выделения групп мягких, умеренных и суровых зим по СГДМ традиционен и хорошо зарекомендовал себя при оценке ледовых условий на различных морях. В работах И.О. Думанской [4, 5] произведен расчет соответствующих интервалов для получения критериев суровости зим по величине СГДМ. Основной целью исследований И.О. Думанской является выявление климатических изменений, произошедших в конце XX – начале XXI веков в ледовых условиях морей России. На основании результатов, полученных в процессе обработки данных многолетнего архива ледовой информации, автор сделал количественные выводы об изменениях в ледовой обстановке морей России за 30 лет на рубеже веков и за первые 15 лет XXI века по сравнению с XX веком.

В последние годы в «Докладах об особенностях климата на территории РФ» [6–9] для характеристики ледовых условий арктических морей, по которым проходит Северный морской

путь (СМП), применяется СГДМ с октября по апрель. Для периода современного потепления отмечаются значительное снижение СГДМ и сокращение площади, занятой морским льдом на акватории морей СМП, в сентябре. Так, для периода 1989–2020 гг. тренды ледовитости (тыс. км²/год) для морей СМП (Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское) как в целом, так и в отдельности во все месяцы отрицательны, кроме отдельных незначимых и близких к нулю трендов с февраля по апрель. Минимальные по абсолютной величине тренды приходятся на апрель, максимальные — на октябрь. Отмечается, что зимой сокращение морского ледяного покрова существенно меньше, чем летом.

Таким образом, в период современного потепления климата, отмечается снижение СГДМ и площади морского льда как в целом на трассах СМП, так и в Карском море в частности. При этом основное внимание уделяется суммам градусодней мороза, а суммы градусодней тепла практически не рассматриваются. Для оценки ледовых условий, как правило, используется ледовитость или площадь ледового покрова (тыс. км²). Для всего региона Карского моря расчеты СГДМ опираются на данные наблюдений только на 6–7 МС.

Цель данной работы: совместная оценка пространственно-временных особенностей тенденций суровости/комфортности температурного режима приземной атмосферы в Карском море и тенденций ледовитости в условиях современного потепления климата.

Материалы

Для характеристики современных тенденций сумм градусодней мороза и тепла выбран период современной климатической нормы 1991–2020 гг. В течение этого периода наблюдается устойчивая тенденция к потеплению, которая объективно отражает особенности современного климата исследуемого региона [10–12]. В результате анализа обеспеченности данными о среднемесячной приземной температуре воздуха

(ПТВ_{срм}) для указанного периода были отобраны 11 МС. Расположение отобранных МС представлено на рис. 1.

Отобранные МС относительно равномерно расположены по побережью Карского моря. Чтобы сформировать ряды данных, необходимых для корректной оценки трендов сумм градусной мороза и тепла (СГДМ, СГДТ) в исследуемом регионе, к МС, расположенным на побережье и островах Карского моря, были добавлены две МС, находящиеся в Баренцевом море (Малые Кармакулы и ГМО им. Э.Т. Кренкеля). Основные характеристики использованных МС представлены в табл. 1.

Для 5-ти МС из рассматриваемых 11-ти сформированы однородные временные ряды без пропусков данных, для 3-х МС доля пропусков данных не превышает 2 %. Для 3-х МС доля пропусков данных во временных рядах не превышает 7,5 %

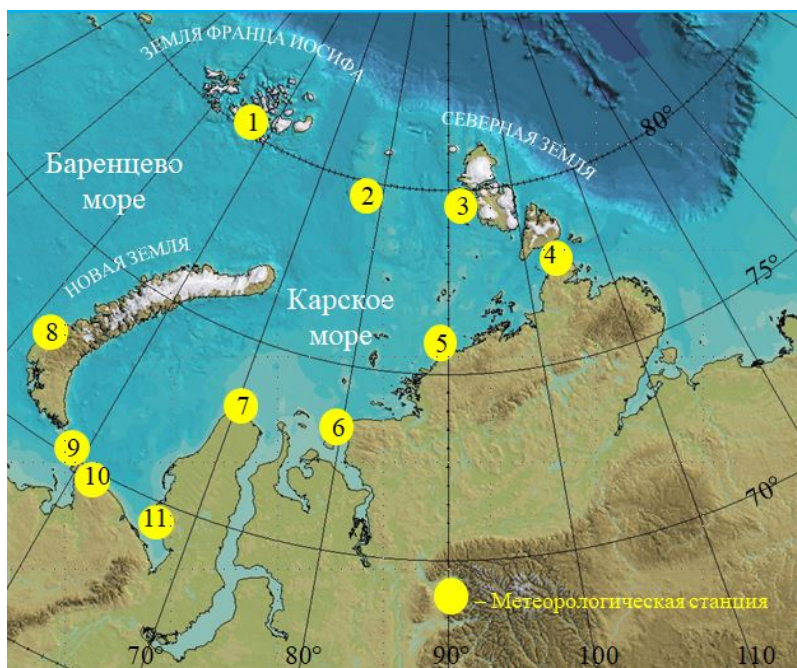


Рис. 1. Местоположение 11 МС в Карском и Баренцевом морях

Таблица 1

Характеристики 11 МС и оценка доли пропусков данных во временных рядах ПТВ_{срм} за период 1991–2020 гг. в % от общего числа среднемесячных значений за 30-летний период

№ на рис. 1	№ ВМО	Название МС	Координаты станции		Высота н.у.м., м	Пропуски данных, %
			Широта	Долгота		
1	20046	ГМО им. Э.Т. Кренкеля	80°37'	58°03'	21	0
2	20069	Остров Визе	79°30'	76°59'	12	0
3	20087	им. Г.А. Уша- кова (о-в Го- ломянный)	79°33'	90°37'	7	0,3
4	20292	ОГМС им. Е.К. Федорова (м. Челюскин)	77°43'	104°18'	14	0,6
5	20476	Мыс Стерлегова	75°25'	88°54'	10	6,1
6	20674	Остров Диксон	73°31'	80°24'	42	0
7	20667	им. М.В. По- пова (о-в Белый)	73°20'	70°03'	4	7,5
8	20744	Малые Кармакулы	72°22'	52°43'	18	0
9	20946	МГМС им. Е.К. Федорова (о-в Вайгач)	70°27'	59°05'	13	5,8
10	23022	Амдерма	69°46'	61°41'	53	0
11	23032	Маррессаля	69°43'	66°48'	24	1,9

от общего числа значений ПТВ_{срм}, входящих в исследуемый 30-летний период. Таким образом, по данным регулярных инструментальных наблюдений для 11-ти МС сформированы временные ряды ПТВ_{срм} для всех календарных месяцев, при-

чем доля инструментальных наблюдений в сформированных временных рядах $\text{ПТВ}_{\text{срм}}$ составляет более 92 %.

Временные ряды значений $\text{ПТВ}_{\text{срм}}$ сформированы на основе базы данных Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД, г. Обнинск, www.meteo.ru), находящихся в открытом доступе. Обнаруженные пропуски во временных рядах $\text{ПТВ}_{\text{срм}}$ заполнены рассчитанными величинами на основе имеющихся данных срочных наблюдений в Госфонде Арктического и антарктического научно-исследовательского института (г. Санкт-Петербург, www.aari.ru) и климатических архивов CRUTEM и GHCNM (www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature; www.researchgate.net/publication/327813859_The_Global_Historical_Climatology_Network_Monthly_Temperature_dataset_Version_4).

Методы

В данном исследовании для характеристики климата применен накопительный показатель — СГДМ и СГДТ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{день}$). Этот количественный показатель является универсальной характеристикой «суровости» зимних и «комфортности» летних месяцев. В качестве исходных данных использовались значения $\text{ПТВ}_{\text{срм}}$. Для каждого месяца каждого года периода 1991–2020 гг. рассчитывалась оценка суммы градусодней $S_{\text{мес}}$ по формуле

$$S_{\text{мес}} = \text{ПТВ}_{\text{срм}} \cdot n,$$

где n — число дней в месяце, т.е. 30/31 день, для февраля 28/29 дней (с учетом високосного года).

Таким образом, получены временные ряды сумм градусодней для периода 1991–2020 гг. Для каждого месяца рассчитаны средние за 30-летний период (1991–2020 гг.) значения суммы градусодней. Предварительный анализ показал, что во всем исследуемом регионе с октября по май включительно среднемесячные суммы градусодней отрицательны, в июле–августе — положительны. В июне и сентябре на севере Карского

моря наблюдаются отрицательные среднемесячные суммы градусодней, на остальной акватории суммы градусодней положительны.

Для исследования периодов, в течение которых во всем исследуемом регионе наблюдаются среднемесячные суммы градусодней одного знака, для каждого года (1991–2020 гг.) рассчитывалась СГДМ с октября по май включительно (S_{X-V}) и СГДТ для периода июль–август ($S_{VII-VIII}$). Причем при расчете СГДМ за январь–май учитывались данные текущего года, а за октябрь–декабрь — данные предыдущего года:

$$S_{X-V} = \sum_X^V S_{\text{мес.}}$$

Аналогично для каждого года (1991–2020 гг.) была определена СГДТ для периода июль–август, и естественно за июль–август учитывались данные текущего года:

$$S_{VII-VIII} = \sum_{VII}^{VIII} S_{\text{мес.}}$$

Количественный анализ многолетних изменений СГДМ и СГДТ осуществлен путём расчета линейных трендов. В качестве числовых характеристик линейного тренда принимались его величина (угловой коэффициент a , °С · день/год), коэффициент детерминации, выражающий в % долю дисперсии исходного ряда, описываемую полученным трендом, и уровень статистической значимости выявленного тренда [13].

В данном исследовании и в своих более ранних работах [14] авторы каждому тренду ставят в соответствие его статистическую значимость с использованием значений: 0,01; 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; ... и далее кратно 0,05. При этом обсуждается статистическая значимость/незначимость трендов, принимаемых/не принимаемых к рассмотрению. Опыт показывает, что статистическая значимость трендов в значительной степени зависит от выбранного временного масштаба. Тренды среднегодовых значений параметра статистически значимы на довольно высоком уровне, статистическая значимость трендов

для календарных сезонов ниже, а для календарных месяцев еще ниже. В данном исследовании все линейные тренды сумм градусодней, рассчитанные для периода X–V, статистически значимы на уровне $p < 0,01$, но в целом статистическая значимость исследуемых линейных трендов изменяется в довольно широких пределах (табл. 2).

Таблица 2

Количество (в %) линейных трендов сумм градусодней с различными уровнями статистической значимости (p) от общего числа линейных трендов, рассчитанных для 4-х периодов (X–V, VI, VII–VIII, IX) по данным 11 МС Карского моря

p	<0,01	0,01–0,05	0,06–0,10	0,11–0,15	0,16–0,20	>0,20
%	61	18	7	5	5	4

Как следует из табл. 2, линейные тренды с уровнем статистической значимости $p < 0,05$ составляют 79 % от общего числа рассчитанных трендов. Для детального анализа внутри-годовых изменений трендов сумм градусодней нами принято решение принять во внимание линейные тренды, статистически значимые на уровне $p \leq 0,20$, что составляет 96 % от их общего числа. Таким образом, при выявлении тенденций сумм градусодней рассматриваются линейные тренды, статистически значимые с вероятностью не менее 80 % (что соответствует уровню статистической значимости $p \leq 0,20$). Все линейные тренды, статистически значимые с вероятностью менее 80 %, проверены на наличие нелинейной связи. Нелинейных связей не обнаружено.

Для графической визуализации распределения средних за период 1991–2020 гг. сумм градусодней и выявленных линейных трендов, а именно угловых коэффициентов a (т.е. скоростей изменения сумм градусодней) применен способ изолиний. Результаты, полученные для МС № 8 (Малые Кармакулы), находящейся на баренцевоморском берегу архипелага Новая Земля, принимаются к сведению, но не играют решающей роли при построении изолиний.

Для сравнительного анализа изменений «суровости» зим и «комфортности» летних месяцев за 1991–2020 гг. рассчитаны средние для 3-х ледовых районов суммы градусодней (X–V, VI, VII–VIII, IX) (рис. 2). Границы ледовых районов Карского моря показаны согласно работам Е.У. Миронова [15] и В.П. Каркина и др. [16]. Для расчета сумм градусодней по ледовым районам использованы данные 10-ти МС.

Для периода 1991–2020 гг. значения сумм градусодней за октябрь–май во всех трех ледовых районах отрицательны, а за июль–август — положительны. За рассматриваемый 30-летний период суммы градусодней за июнь и сентябрь в Скар и Вкар меняют знак с отрицательного в начале периода ($S_{1991} < 0$) на положительный в конце периода ($S_{2020} > 0$). Для таких

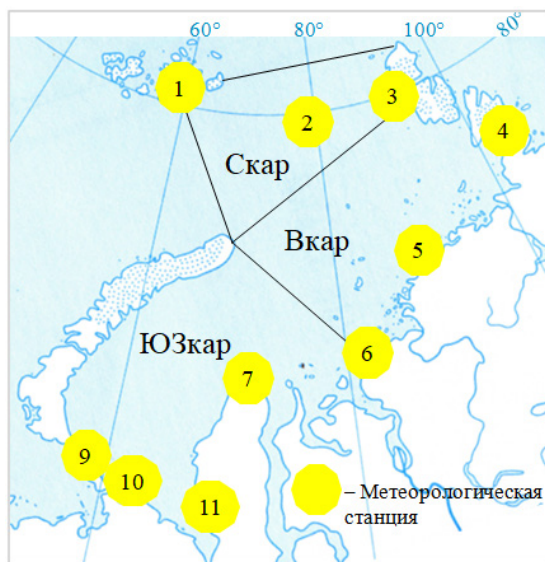


Рис. 2. Ледовые районы Карского моря: Скар — северный (1 — ГМО им. Э.Т. Кренделя, 2 — Остров Визе, 3 — им. Г.А. Ушакова (о-в Голомянный)); Вкар — восточный (4 — ОГМС им. Е.К. Федорова (м. Челюскин); 5 — Мыс Стерлегова; 6 — Остров Диксон); ЮЗкар — юго-западный (7 — им. М.В. Попова (о-в Белый); МГМС им. Е.К. Федорова (о-в Вайгач); 10 — Амдерма; 11 — Марресалы)

случаев дата перехода сумм градусодней (S) через $0\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{день}$ определена как точка пересечения соответствующего линейного тренда $S = at + b$ с прямой $S = 0$.

Ранее авторами данной работы для указанных ледовых районов Карского моря были определены среднемесячные значения ледовитости и соответствующие тренды для периода 1991–2020 гг. [17]. Здесь для 3-х ледовых районов Карского моря мы дополнительно рассчитали средние значения ледовитости и соответствующие тренды для двух периодов, в течение которых суммы градусодней во всем исследуемом регионе одного знака. Это 8-месячный период с октября по май включительно (суммы градусодней отрицательны) и 2-месячный период июль–август (суммы градусодней положительны).

Для графической визуализации распределения средних за период 1991–2020 гг. значений ледовитости (%) и выявленных линейных трендов (%/год), а именно угловых коэффициентов (т.е. скоростей изменения ледовитости) применен способ картограмм [18, 19].

Результаты

1. Сезонные изменения СГДМ, СГДТ и ледовитости в период 1991–2020 гг.

В период 1991–2020 гг. в исследуемом регионе СГДМ и СГДТ изменяется от месяца к месяцу и от ледового района к ледовому району в широком диапазоне от $-850\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{день}$ в январе в Вкар до $260\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{день}$ в июле в ЮЗкар (рис. 3). Положительные суммы градусодней отмечаются в течение двух месяцев (июль–август) в Скар, в течение четырех месяцев (июнь–сентябрь) в Вкар и ЮЗкар, в остальное время года суммы градусодней отрицательны.

Как показано авторами [17], ледовитость в период 1991–2020 гг. изменяется от месяца к месяцу и от ледового района к ледовому району: от менее 5 % в сентябре в ЮЗкар до 100 % с января по май в Скар и Вкар (рис. 3). В марте–апреле ледо-

витость максимальна, с мая по сентябрь происходит ее сезонное уменьшение, в сентябре она минимальна, а с октября по февраль происходит ее закономерное сезонное повышение.

Максимальные значения ледовитости наблюдаются в месяцы, когда отмечаются минимальные значения сумм градусодней. Максимальные суммы градусодней отмечаются в Скар в июле, в Вкар и ЮЗкар — в июле–августе. Минимальные значения ледовитости отмечаются во всех трех районах позже — в сентябре. Таким образом, минимальная ледовитость отмечается на 1–2 месяца позже наблюдаемых максимальных значений СГДТ.

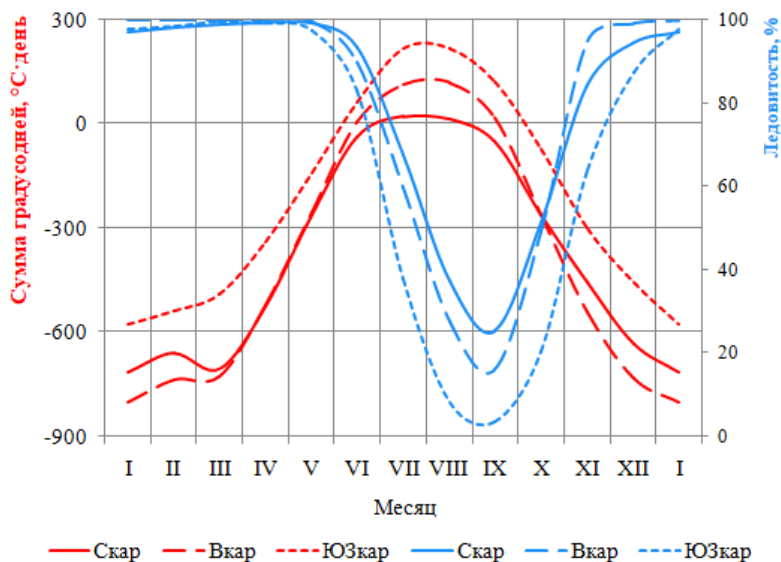


Рис. 3. Годовой ход СГДМ и СГДТ, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{день}$ (красные линии) и ледовитости, % (синие линии) за период 1991–2020 гг. в ледовых районах Карского моря (Скар — северном, Вкар — восточном, ЮЗкар — юго-западном). Суммы градусодней и ледовитость показаны с января по январь, с центром в июле. Месяцы, предшествующие июлю (слева), соответствуют сезону возрастания сумм градусодней (времени года, когда происходит повышение ПТВ), в то время как месяцы, следующие за июлем (справа), соответствуют сезону снижения сумм градусодней (времени года, когда происходит снижение ПТВ)

2. *Оценки среднемноголетней суровости/комфортности термического режима за период 1991–2020 гг. и современные тенденции СГДМ и СГДТ*

В течение восьми месяцев **с октября по май** включительно среднемесячные суммы градусодней для всего исследуемого региона отрицательны. Поле средних СГДМ для этого периода имеет четко выраженный рельеф с понижением значений в направлении с запада на восток. Таким образом, «суровость» зимних месяцев возрастает в направлении с запада на восток. Объединенное для периода октябрь–май поле СГДМ представлено на рис. 4, а. Средние за 30-летний период 1991–2020 гг. суммы градусодней изменяются от $-2500^{\circ}\text{C}\cdot\text{день}$ на юго-западе Карского моря до менее $-4500^{\circ}\text{C}\cdot\text{день}$ на востоке (рис. 4, а).

В течение четырех месяцев **с июня по сентябрь** включительно поле сумм градусодней имеет также четко выраженный рельеф, но уже с понижением в направлении с юга на север (рис. 4, б–г), т.е. «комфортность» этих месяцев снижается в другом, по сравнению с ростом суровости зимних месяцев, направлении. При этом в течение двух месяцев (**июль–август**) суммы градусодней для всего исследуемого региона положительны. Объединенное для периода июль–август поле СГДТ представлено на рис. 4, в. Средние за 1991–2020 гг. СГДТ снижаются от более $400^{\circ}\text{C}\cdot\text{день}$ на юго-западе Карского моря до менее $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{день}$ на севере региона (рис. 4, в).

Рельеф поля сумм градусодней **в июне** по сравнению с полем **в октябре–мае**, сохраняющим характерный для месяцев с отрицательными значениями сумм градусодней рельеф (рис. 4, а), существенно изменяется (рис. 4, б). Поле сумм градусодней в **июне** приобретает рельеф, характерный для месяцев с положительными значениями сумм градусодней (рис. 4, в). При этом в **июне** на большей части исследуемого региона появляются уже положительные суммы градусодней, и лишь на севере сохраняются отрицательные значения.

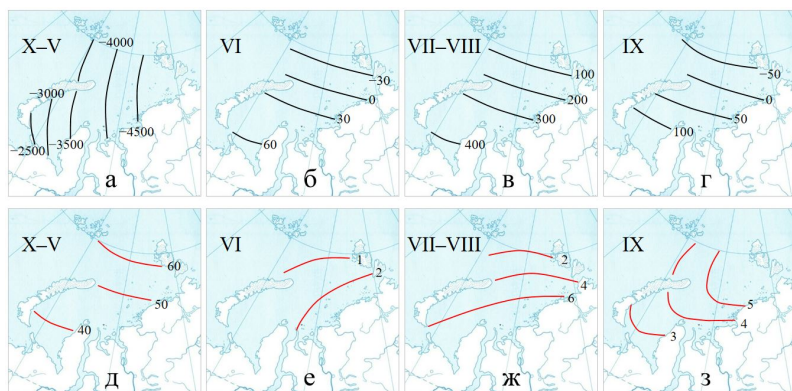


Рис. 4. Средние за 30-летний период значения СГДМ и СГДТ, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{день}$ (черные линии) для периодов октябрь–май (а), июнь (б), июль–август (в), сентябрь (г) и тренды соответствующих сумм (красные линии), $^{\circ}\text{C} \cdot \text{день/год}$ для тех же периодов (д, е, ж, з)

В **сентябре** поле сумм градусодней сохраняет рельеф, характерный для месяцев с положительными значениями сумм градусодней (рис. 4, в), причем на большей части исследуемого региона сохраняются положительные суммы градусодней, и только на севере Карского моря появляются отрицательные значения (рис. 4, г).

В течение 1991–2020 гг. наблюдаются положительные, статистически значимые тенденции сумм градусодней для отдельных календарных месяцев и периодов (октябрь–май и июль–август). Линейные тренды СГДМ (**октябрь–май**) положительны и статистически значимы на уровне $p < 0.01$, т.е. за период 1991–2020 гг. наблюдается устойчивое снижение «суровости» зим. Пространственное распределение трендов СГДМ представлено на рис. 4, д. Скорость уменьшения «суровости» зим изменяется в направлении с юга на север: от менее $40^{\circ}\text{C} \cdot \text{день/год}$ на юго-западе до более $60^{\circ}\text{C} \cdot \text{день/год}$ на севере исследуемого региона.

Линейные тренды сумм градусодней **с июня по сентябрь** включительно также положительны, т.е. наблюдается повышение «комфортности» этих месяцев. Скорости повышения

«комфортности» летних месяцев (**июнь, июль–август**) снижаются в направлении с юго-востока на северо-запад: наибольшие скорости наблюдаются на юго-востоке, наименьшие — на севере исследуемого региона (рис. 4, *е, ж*). По-видимому, более высокие темпы роста комфортности лета в **июне и июле–августе** у побережья Таймырского полуострова обусловлены стоком Оби и Енисея (Обь-Енисейское течение). В **сентябре** рельеф поля трендов сумм градусодней изменяется: скорости повышения «комфортности» сентября растут в направлении с юго-запада на северо-восток исследуемого региона (рис. 4, *з*). Следует отметить, что рельеф трендов сумм градусодней для июня, июля–августа и сентября соответствует установленному ранее рельефу трендов среднемесячных значений ПТВ [10].

3. Оценки среднемноголетних показателей ледовитости (%) за период 1991–2020 гг. и современные тенденции ледовитости (%/год)

Пространственное распределение средних за 30-летний период значений ледовитости и соответствующих трендов в трех ледовых районах Карского моря для рассматриваемых временных интервалов (октябрь–май, июнь, июль–август и сентябрь) представлено на рис. 5.

Для периода **октябрь–май** и **июнь** среднемноголетние значения ледовитости во всех трех ледовых районах превышает 80 % (рис. 5, *а, б*). В **июле–августе** на северо-востоке исследуемого региона ледовитость снижается до 40–60 %, а на юго-западе — до 20–40 %. В **сентябре** снижение ледовитости продолжается: на севере исследуемого региона ледовитость снижается до 20–40 %, на востоке и юго-западе — до менее 20 %.

В течение 1991–2020 гг. в рассматриваемых трех ледовых районах Карского моря наблюдаются статистически значимые на уровне $p < 0,01$ тенденции ледовитости (%/год) как для отдельных календарных месяцев (**июнь, сентябрь**), так и для периодов **октябрь–май** и **июль–август**. Исключение составляет район ЮЗкар, в котором в **сентябре** ледовитость снижа-

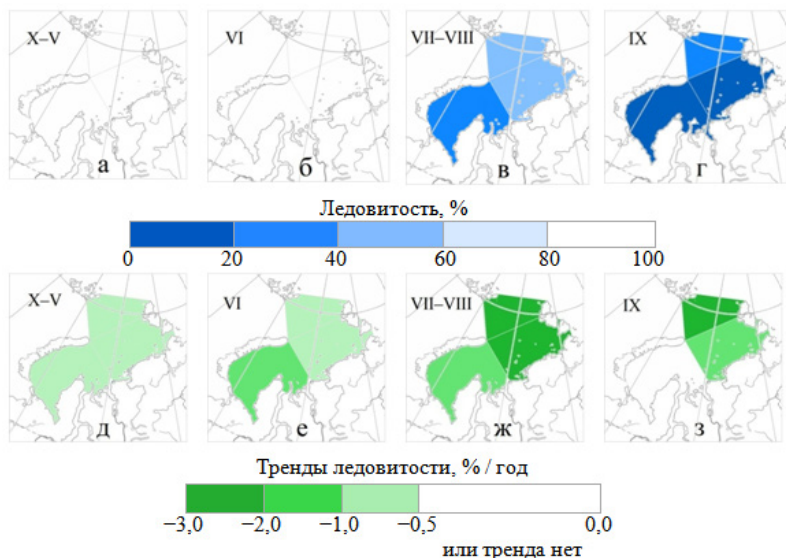


Рис. 5. Средние за 30-летний период значения ледовитости (%) для периодов октябрь–май (а), июнь (б), июль–август (в), сентябрь (г) и тренды ледовитости, %/год соответствующих периодов (д, е, ж, з)

ется до значения менее 5 % (см. рис. 3), и поскольку лед практически отсутствует, то нет смысла говорить о тенденциях ледовитости.

Линейные тренды ледовитости для всех рассматриваемых временных интервалов отрицательны. За период 1991–2020 гг. наблюдается устойчивое снижение ледовитости в исследуемом регионе. Пространственное распределение трендов ледовитости представлено на рис. 5, д–з. В период **октябрь–май** во всех ледовых районах отмечаются тренды ледовитости от $-0,5$ до $-1,0$ %/год (рис. 5, д). В **июне** многолетний процесс снижения ледовитости усиливается на юго-западе региона, где отмечаются тренды до $-2,0$ %/год (рис. 5, е). В **июле–августе** многолетний процесс снижения ледовитости распространяется на северо-восток исследуемого региона: скорости изменения ледовитости находятся в пределах от -2 до -3 %/год (рис. 5, ж). В **сентябре** на северо-востоке региона сохраняются значи-

тельные скорости снижения ледовитости, на остальной акватории многолетний процесс снижения ледовитости практически отсутствует (рис. 5, з).

4. Оценка изменений «суровости» зим, «комфортности» летних месяцев и ледовитости за 30-летний период

В период 1991–2020 гг. многолетние изменения сумм градусодней в ледовых районах Карского моря имеют определенные закономерности. Суммы градусодней за октябрь–май в течение всех 30-лет во всех трех ледовых районах принимают отрицательные значения, а за июль–август — положительные. Суммы градусодней за июнь и сентябрь в исследуемом 30-летнем периоде в некоторых случаях на северо-востоке региона (в Скар и Вкар) меняют знак: в начале периода — отрицательны, в конце — положительны.

Для иллюстрации вышесказанного на рис. 6 представлены многолетние изменения сумм градусодней в одном из ледовых районов Карского моря (Вкар). За октябрь–май (рис. 6, а) и июль–август (рис. 6, в) суммы градусодней в течение 30 лет отрицательны и положительны соответственно. Суммы градусодней сентября (рис. 6, з) в 2002–2003 гг. переходят от отрицательных значений к положительным. Практически в это же время в 2003–2004 гг. суммы градусодней июня также переходят от отрицательных к положительным значениям (рис. 6, б).

Также следует отметить, что в Скар суммы градусодней сентября в 2017–2018 гг. перешли от отрицательных к положительным значениям.

Соответствующие показатели для количественной оценки изменений «суровости» зим, «комфортности» летних месяцев и ледовитости, рассчитанные для ледовых районов, представлены в табл. 3 и 4. Линейные тренды сумм градусодней и ледовитости, рассчитанные для ледовых районов Карского моря, статистически значимы на уровне не менее 0,20 (табл. 3). Причем три четверти (75 %) линейных трендов сумм градусодней

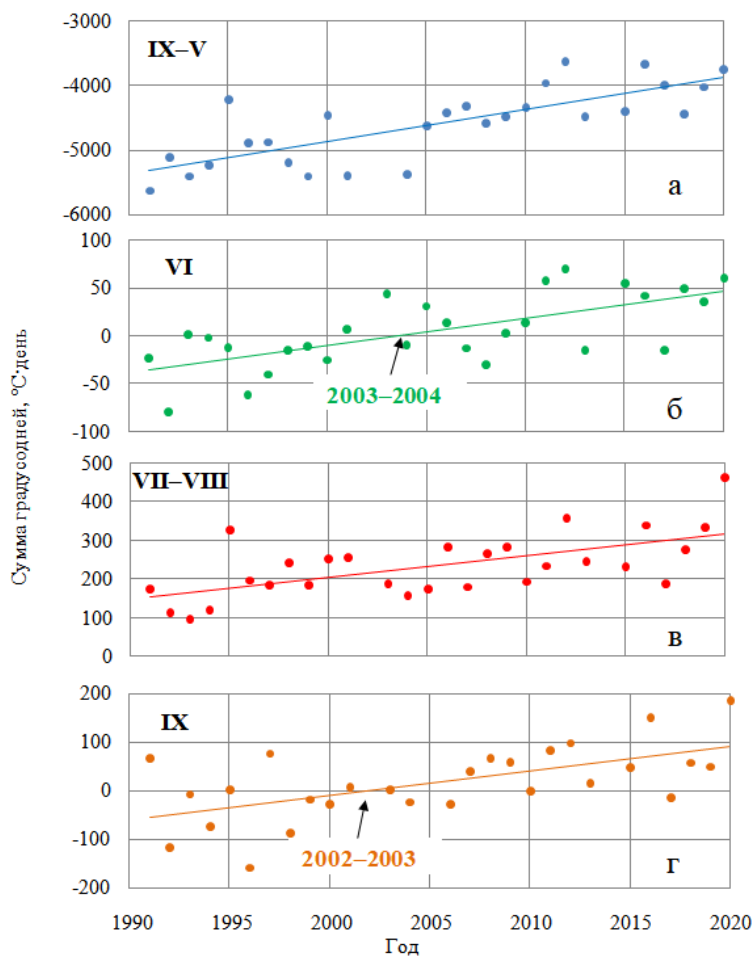


Рис. 6. Изменения сумм градусодней в Вкар в октябре–мае (а), июне (б), июле–августе (в), сентябре (г) и соответствующие линейные тренды в период 1991–2020 гг. Для июня и сентября отмечены даты перехода линейного тренда через $0^{\circ}\text{C} \cdot \text{день}$

статистически значимы на уровне $p < 0.05$, и подавляющая часть (92 %) линейных трендов ледовитости статистически значима на уровне $p < 0.01$. Исключение составляет статистически незначимый линейный тренд ледовитости в сентябре в ЮЗкар.

За период 1991–2020 гг. все линейные тренды сумм градусодней положительны, а линейные тренды ледовитости отрицательны. Следовательно, за рассматриваемый период все суммы градусодней растут (снижается суровость зимних и повышается комфортность летних месяцев) и снижается ледовитость.

Наиболее значительное снижение суровости зимы (**октябрь–май**) наблюдается в Скар: за 30 лет сумма градусодней увеличилась на $1965^{\circ}\text{C}\cdot\text{день}$ (табл. 3), при этом ледовитость снизилась на 23 % (табл. 4).

В **июне, июле–августе и сентябре** наиболее значительное повышение сумм градусодней происходит в Вкар: за 30 лет на 84, 171 и $153^{\circ}\text{C}\cdot\text{день}$ соответственно (табл. 3). Кроме того, как было сказано выше, в начале 2000-х гг. в Вкар произошел переход сумм градусодней июня и сентября от отрицательных значений к положительным. При этом ледовитость Вкар в **июне, июле–августе и сентябре** заметно снизилась: за 30 лет на 20, 60 и 43 % соответственно (табл. 4).

В **июне** наиболее существенно ледовитость снизилась в ЮЗкар: за 30 лет на 36 %. В **июле–августе и сентябре** самое значительное снижение ледовитости произошло в Скар: за 30 лет на 78 и 72 % (табл. 4). Кроме того, как было сказано выше, в конце 2010-х гг. в Скар произошел переход сумм градусодней сентября от отрицательных значений к положительным.

В целом за период 1991–2020 гг. во всем регионе заметно уменьшилась суровость зим (**октябрь–май**) и повысилась комфортность летних месяцев (**июль–август**). Отрицательные суммы градусодней **июня и сентября** на северо-востоке региона к концу исследуемого периода сменились положительными значениями. Наиболее заметное уменьшение ледовитости произошло в летние месяцы: в **июне** — на юго-западе, в **июле–августе и сентябре** — на северо-востоке региона.

Таблица 3

Показатели линейных трендов сумм градусодней по ледовым районам для временных интервалов октябрь–май, июнь, июль–август и сентябрь за период 1991–2020 гг.: a — угловой коэффициент, °С·день/год; R^2 — коэффициент детерминации; p — уровень статистической значимости; Δ — изменение суммы градусодней за 30 лет, °С·день

Ледовый район	X-V				VI				VII-VIII				IX			
	<i>a</i>	<i>R</i> ²	<i>p</i> <	Δ	<i>a</i>	<i>R</i> ²	<i>p</i> <	Δ	<i>a</i>	<i>R</i> ²	<i>p</i> <	Δ	<i>a</i>	<i>R</i> ²	<i>p</i> <	Δ
Скар	65,5	0,671	0,01	1965	0,9	0,115	0,10	27	2,0	0,263	0,01	60	4,1	0,419	0,01	123
Вкар	50,0	0,608	0,01	1500	2,8	0,448	0,01	84	5,7	0,387	0,01	171	5,1	0,373	0,01	153
ЮЗкар	43,8	0,575	0,01	1314	1,4	0,073	0,20	42	4,8	0,204	0,05	144	3,3	0,293	0,01	99

Таблица 4

Показатели линейных трендов ледовитости по ледовым районам за период 1991–2020 гг.:

a — угловой коэффициент, %/год; R^2 — коэффициент детерминации;

p — уровень статистической значимости; Δ — изменение ледовитости за 30 лет, %

Ледовый район	X-V			VI			VII-VIII			IX						
	<i>a</i>	<i>R</i> ²	<i>p</i> <	Δ	<i>a</i>	<i>R</i> ²	<i>p</i> <	Δ	<i>a</i>	<i>R</i> ²	<i>p</i> <	Δ				
Скар	-0,78	0,597	0,01	-23	-0,57	0,289	0,01	-17	-2,59	0,647	0,01	-78	-2,40	0,489	0,01	-72
Вкар	-0,41	0,477	0,01	-12	-0,66	0,344	0,01	-20	-1,99	0,491	0,01	-60	-1,43	0,341	0,01	-43
ЮЗкар	-0,55	0,469	0,01	-17	-1,20	0,282	0,01	-36	-1,00	0,345	0,01	-30	-0,03	0,056	0,21	-1

Обсуждение

Суммы градусодней традиционно рассчитываются по суточным данным температуры воздуха на МС. В данной работе суммы градусодней мороза/тепла рассчитаны по среднемесячным данным температуры воздуха на МС, что позволяет в первом приближении с точностью до месяца выявить временные интервалы, в течение которых во всем регионе Карского моря суммы градусодней отрицательны/положительны, и переходные к ним. Для периода 1991–2020 гг. в октябре–мае суммы градусодней во всем исследуемом регионе отрицательны, в июле–августе — положительны. В переходные месяцы (июнь и сентябрь) на большей части региона суммы градусодней положительны, на севере — отрицательны. Выделение временных интервалов, в которых проводились совместные исследования тенденций изменения сумм градусодней и тенденций ледовитости, не противоречат общим принципам и подходам к исследованию климатических изменений площади морских льдов в российских арктических морях. Как отмечено в работе [20], изменение площади льда в арктических морях имеет хорошо выраженный сезонный ход, в котором можно выделить два периода: осенне-зимнее накопление и нарастание с октября по апрель; весенне-летнее таяние и сокращение площади льдов с мая по сентябрь. Максимум развития ледяного покрова приходится на март–апрель, минимум — на сентябрь. Таким образом, полный и законченный цикл изменения ледяного покрова происходит не в календарном году (с января по декабрь), а в гидрологическом году (с октября по сентябрь).

Тенденции снижения «суровости» зим в регионе Карского моря, определенные в данной работе для периода современной климатической нормы 1991–2020 гг., хорошо согласуются с результатами других исследований. Так, в «Докладах об особенностях изменения климата на территории РФ» [6–9] отмечается значительное сокращение СГДМ (с октября по апрель) в условиях современного потепления, полученное по наблю-

дениям на МС, расположенных вдоль трасс СМП (Карское – Чукотское моря).

Тенденции снижения «суровости» зим, количественные оценки которых получены в данной работе, соответствуют результатам типизации зим по степени их суровости, представленным в фундаментальном исследовании И.О. Думанской [4, 5]. В ее работе критерии мягких, умеренных и суровых зим для Карского моря рассчитаны по данным наблюдений за ПТВ в XX веке на 6-ти МС. СГДМ в регионе Карского моря, рассчитанные в нашей работе для периода 1991–2020 гг., получены по наблюдениям на 11-ти МС и соответствуют, по классификации О.И. Думанской, критериям «мягкой» зимы.

Основные закономерности тенденций изменения СГДМ О.И. Думанская выявляет при сопоставлении оценок, рассчитанных для трех периодов: от начала наблюдений на МС до 2000 г., 1986–2015 гг. и 2001–2015 гг. Автор отмечает заметное уменьшение СГДМ в период современного потепления. При этом, как показано в работе [5], уменьшение СГДМ на рубеже XX–XXI веков (1986–2015 гг.) на островных МС в северной части Карского моря более значительно, чем на прибрежных, и этот результат подтверждается нашими последними исследованиями [10]. Действительно, в нашей работе на рис. 4, д показано, что тренды СГДМ для периода октябрь–май растут в направлении с юга на север, более того представленные средние скорости уменьшения СГДМ, рассчитанные за период 1991–2020 гг., близки к значениям скоростей, рассчитанным за период 1986–2015 гг. [5].

Для арктических морей установлено [21], что интенсивность потепления имеет прямую линейную зависимость от географической широты, нарастая с юга на север на $1,35\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ при изменении географической широты на 1° . Эта закономерность подтверждает тот факт, что именно в центральной Арктике наиболее значительно проявились последствия глобального потепления («Арктическое усиление»).

В «Докладах об особенностях изменения климата на территории РФ» [6–9] отмечается, что для периода современного потепления наблюдается значительное сокращение площади, занятой морским льдом на акватории Сибирских арктических морей (Карское – Чукотское моря) в конце летнего сезона (сентябрь). В Докладе [7] приводятся оценки трендов ледовитости (тыс. м²/год) в морях СМП, в том числе и в Карском море. Для периода 1989–2020 гг. тренды ледовитости для Карского моря в целом с июня по декабрь отрицательны, максимальные по абсолютной величине тренды приходятся на июль и октябрь, а с января по май тренды ледовитости близки к нулю и статистически незначимы.

Современные тенденции ледовитости (%) в Карском море подробнейшим образом исследованы авторами ранее [17]. В данной работе сделана попытка исследовать тенденции ледовитости в июне–сентябре, т.к. именно в этот период наблюдается максимальная активность на трассах СМП. В работе О.И. Думанской [5] современные тенденции ледовитости Карского моря в целом и его частей определены при сопоставлении средней декадной ледовитости в июне–сентябре, рассчитанной для второй половины XX века (1940–2000 гг.) и для начала XXI века (2001–2015 гг.). Зафиксировано значительное уменьшение ледовитости Карского моря в XXI веке по сравнению со второй половиной XX века в июне–сентябре. При этом наибольший вклад в уменьшение ледовитости в июне и июле вносит юго-западная часть моря, а в августе и сентябре — северо-восточная часть. В нашей работе тренды ледовитости, рассчитанные за 30-летний период (1991–2020 гг.), показывают, что в июне наиболее интенсивно снизилась ледовитость в юго-западной части, в июле–августе и сентябре — в его северо-восточной части (табл. 4).

Таким образом, полученные нами оригинальные результаты хорошо согласуются с результатами предыдущих исследователей, при этом нами получены более детальные количественные оценки не только современных тенденций уменьшения

суровости зим, но и тенденций повышения комфортности летних месяцев на фоне наблюдаемых тенденций ледовитости.

Заключение

Установлено, что в регионе Карского моря для периода современной климатической нормы 1991–2020 гг. характерно следующее.

В годовом ходе максимумы сумм градусодней (положительные значения) отмечаются на севере региона в июле, на остальной акватории в июле–августе. Минимальные значения ледовитости в Карском море отмечаются в сентябре, т.е. минимальная ледовитость отмечается на 1–2 месяца позже наблюдаемого максимума СГДТ.

С октября по май включительно среднемесячные значения сумм градусодней отрицательны, в июле–августе — положительны во всем регионе. В июне и сентябре в северной части региона наблюдаются отрицательные среднемесячные значения сумм градусодней, в центральной и южной частях региона — положительные. В целом «суровость» зимы (октябрь–май) возрастает в направлении с запада на восток региона, а «комфортность» лета (июнь–сентябрь) снижается в направлении с юга на север. Наиболее «суровая» зима и наименее «комфортное» лето наблюдаются на северо-востоке исследуемого региона.

В регионе наблюдаются устойчивые, статистические значимые тенденции снижения «суровости» зимы и повышения «комфортности» лета. Скорость снижения «суровости» зимы (октябрь–май) растет в направлении с юга на север. Наибольшие скорости повышения «комфортности» лета (июнь–август) наблюдаются на юго-востоке, сентябрь — на северо-востоке региона.

С октября по июнь включительно ледовитость во всех трех ледовых районах региона превышает 80 %. В июле–сентябре ледовитость снижается, в сентябре она минимальна: на юго-

западе и востоке — менее 20 %, на севере — в пределах 20–40 %.

В регионе наблюдаются устойчивые статистически значимые отрицательные тенденции ледовитости для всех рассматриваемых временных интервалов (октябрь–май, июнь, июль–август, сентябрь), т.е. наблюдается устойчивое снижение ледовитости. В период октябрь–май во всем регионе наблюдаются тренды ледовитости в пределах от $-0,5$ до $-1,0$ %/год. В июне многолетний процесс снижения ледовитости усиливается на юго-западе, в июле–августе распространяется на северо-восток, в сентябре значительные скорости изменения ледовитости (-2 до -3 %/год) сохраняются на севере региона.

Наиболее заметное уменьшение ледовитости произошло в летние месяцы: в июне — на юго-западе, в июле–августе и сентябре — на северо-востоке региона.

В целом за период 1991–2020 гг. во всем регионе заметно уменьшилась суровость зимы (октябрь–май) и повысилась комфортность летних месяцев (июль–август). Отрицательные суммы градусодней июня и сентября на северо-востоке региона к концу исследуемого периода сменились положительными значениями. К 2020 г. отрицательные значения среднемесячных сумм градусодней в период с июня по сентябрь включительно сохранялись только в июне на севере региона.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-27-00112 «Современные изменения арктического климата и экстремальные колебания погоды в западном секторе Северного морского пути».

Литература

1. *Зубов Н.Н.* Льды Арктики. М.: Издательство Главсевморпути, 1945. 360 с.
2. *Weyprecht K.* Die Metamorphosen des Polareises (Oesttrr.-Ungar. Arktische. Expedition 1872–1874). Wien, 1879. 284 p.

3. *Prokhorova U., Alekseev G., Vyazilova A.* Regional and remote influence on the sea ice in the Kara Sea // *J. Mar. Sci. Eng.* 2023. Vol. 11. P. 254. DOI: 10.3390/jmse11020254
4. *Думанская И.О.* Ледовые условия морей европейской части России. М. ; Обнинск : ИГ–СОЦИН, 2014. 608 с.
5. *Думанская И.О.* Ледовые условия морей азиатской части России. М. ; Обнинск : ИГ–СОЦИН, 2017. 640 с.
6. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. М., 2022. 104 с.
7. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. М., 2023. 104 с.
8. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2023 год. М., 2024. 104 с.
9. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. М., 2025. 104 с.
10. *Карандашева Т.К., Иванов Б.В., Демин В.И., Ревина А.Д., Ильющенко И.А., Анциферова А.Р.* Современные тенденции приземной температуры воздуха в регионе Баренцева и Карского морей // *Российская Арктика.* 2024. Т. 6, № 3. С. 55–64. DOI: 10.24412/2658-4255-2024-3-55-64.
11. *Isaksen K., Nordli Ø., Ivanov B. et al.* Exceptional warming over the Barents area // *Sci. Rep.* 2022. Vol. 12. P. 9371. DOI: 10.1038/s41598-022-13568-5
12. *Карандашева Т.К., Демин В.И., Иванов Б.В., Ревина А.Д.* Изменения температуры воздуха в Баренцбурге (Шпицберген) в XX–XXI вв. Обоснование введения новой климатической нормы // *Российская Арктика.* 2021. № 13. С. 25–38. DOI: 10.24412/2658-4255-2021-2-25-38
13. *Рожков В.А.* Теория и методы статистического оценивания вероятностных характеристик случайных величин и функций с гидрометеорологическими примерами. Кн. 2. СПб. : Гидрометеониздат, 2002. 780 с.
14. *Ivanov B., Karandasheva T., Revina A., Sviashchennikov P., Demin V., Isaksen K., Førland E.J., Nordli Ø., Gjeltén H.M.* Assessment of long-term changes in the surface air temperature from the High Arctic archipelago Franz Joseph Land from 1929 to the present (2017) // *Czech. Polar. Rep.* 2021. Vol. 11, No. 1. P. 114–133. DOI: 10.5817/CPR2021-1-9.

15. *Мионов Е.У.* Ледовые условия в Гренландском и Баренцевом морях и их долгосрочный прогноз. СПб. : ААНИИ, 2004. 320 с.
16. *Карклин В.П., Юлин А.В., Шаратунова М.В., Мочнова Л.П.* Кли-
матическая изменчивость ледяных массивов Карского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 4. С. 37–46. DOI: 10.30758/0555-2648-2017-0-4-37-46
17. *Карандашева Т.К., Иванов Б.В., Ревина А.Д., Ильющенкова И.А.* Тенденции ледовитости Баренцева и Карского морей в период современных изменений климата. Российская Арктика. 2024. Т. 6, № 4. С. 5–17. DOI: 10.24412/2658-4255-2024-4-05-17
18. *Берлянт А.М.* Картография : учебник для вузов. М. : Аспект Пресс, 2002. 336 с.
19. *Берлянт А.М., Востоков А.В., Кравцова В.И. и др.* Картоведе-
ние : учебник для вузов / под ред. А.М. Берлянта. М. : Аспект Пресс, 2003. 477 с.
20. Моря российской Арктики в современных климатических усло-
виях. СПб. : ААНИИ, 2021. 360 с.
21. *Думанская И.О.* Некоторые тенденции изменения ледовых харак-
теристик арктических морей в XXI веке // Труды Гидрометцен-
тра России. 2016. Вып. 362. С. 129–154.

АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНЕЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЧИСЛА ДНЕЙ С ГРОЗОЙ НАД ЗАПАДНОЙ СИБИРЬЮ

В.П. Горбатенко, Е.И. Шкель, А.Л. Тунаев

*ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский государственный университет», Томск*

Регион Западной Сибири характеризуется умеренной грозовой активностью. Однако на фоне наблюдаемого в Западной Сибири за последние 30 лет потепления климата увеличивается конвективный потенциал атмосферы, что влечет за собой изменение частоты образования сильных осадков, молний и града. Целью данного исследования является анализ многолетней изменчивости числа дней с грозами на фоне наблюдаемого потепления климата. Задачами исследования являются статистический анализ их тенденций и выявление цикличности в многолетних рядах. Статистически значимое увеличение среднегодовых значений температуры воздуха (с вероятностью не менее 99 %) наблюдается на всех станциях, а числа дней с грозой — на большинстве станций с вероятностью 90 %. Выявлена квазицикличность в рядах температуры воздуха и числа дней с грозой с периодичностью 4–7 и 11–12 лет.

Ключевые слова: число дней с грозой, тенденции, цикличность

ANALYSIS OF LONG-TERM VARIABILITY OF THE NUMBER OF DAYS WITH THUNDERSTORMS OVER WESTERN SIBERIA

V.P. Gorbatenko, E.I. Shkel, A.L. Tunaev

Tomsk State University, Tomsk

The region of Western Siberia is characterized by moderate thunderstorm activity. However, against the background of climate warming observed in Western Siberia over the past thirty years, the convective potential of the atmosphere increases, which entails a change in the frequency of formation of heavy precipitation, lightning and hail. The purpose of

this study is to analyze the long-term variability of the number of days with thunderstorms against the background of the observed climate warming. The objectives of the study are a statistical analysis of their trends and the identification of cyclicity in long-term series. Statistically significant increase in average annual air temperature values (with a probability of at least 99 %) is observed at all stations, and the number of days with thunderstorms at most stations with a probability of 90 %. Quasi-cyclicity in the series of air temperature and the number of days with thunderstorms with a periodicity of 4–7 and 11–12 years was revealed.

Keywords: number of days with thunderstorms, trends, cyclicity

Введение

На фоне глобального потепления климата специалистам разных производственных сфер большинства регионов приходится сталкиваться с проблемами увеличения повторяемости экстремальных событий [1, 2]. Несмотря на то, что Западно-Сибирский регион характеризуется умеренной грозовой активностью [3, 4], на протяжении всего периода метеорологических наблюдений были обнаружены различные вариации межгодовой изменчивости грозовой активности как в целом по региону, так и в пределах отдельных административных областей [5, 6]. На фоне наблюдающегося в последнее тридцатилетие изменения климата Западной Сибири, конвективный потенциал атмосферы усиливается [7], что влечет за собой изменение частоты формирования ливневых осадков, молний и града. В 2020 г. было зафиксировано максимальное число дней с грозой на всех метеорологических станциях, расположенных даже над азиатской частью Арктического сектора России [8].

Пространственно-временной анализ распределения плотности разрядов молний над территорией Западной Сибири по данным WWLLN [9] за период с 2016 по 2020 г. выявил наибольшую грозовую активность в районе г. Ханты-Мансийск ($0,76 \text{ разр.}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$), при этом средние для территории Западной Сибири значения молниевой активности составили $0,25 \text{ разр.}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$. Повышенные значения плотности разрядов молнии для окрестностей Ханты-Мансийска были получе-

ны и по результатам спутниковой регистрации молний за период 1995–1999 гг. [10]. Поскольку среднее многолетнее число дней с грозой в районе Ханты-Мансийска было почти в 2 раза меньше, чем над другими территориями Западной Сибири, изучение закономерностей изменчивости грозовой активности на фоне меняющегося климата для различных районов Западной Сибири стало актуальной задачей. Согласно данным справочников по климату, число дней с грозой в районе Ханты-Мансийска составляло 16 дней, а наибольшие годовые суммы числа дней с грозой, наблюдаемые на метеостанциях Алтайского края, — 30 дней [5]. Поскольку продолжительность грозового сезона (количество дней между первой и последней грозой в году) увеличилась в среднем на 5 дней на широте 60° с.ш. и на 15 дней на широте 55° с.ш., есть основания ожидать и увеличения суммы числа дней с грозой.

Целью настоящих исследований является анализ многолетней изменчивости числа дней с грозой (1978–2023 гг.) на фоне наблюдающегося потепления климата Западной Сибири.

Объектом исследования является анализ многолетней изменчивости числа дней с грозой на станциях Западной Сибири, расположенных в разных широтах. Рассматривалась территория, ограниченная параллелями 54–62 с.ш. и меридианами 65–85 в.д. Задачами исследования являются статистический анализ тенденций грозовой активности и выявление цикличности в многолетних рядах числа дней с грозой.

Материалы и методы исследований

Судить об изменчивости грозовой активности на фоне меняющегося климата можно только при анализе многолетних наблюдений за ее интенсивностью. Поскольку над территорией Западной Сибири отсутствуют многолетние инструментальные наблюдения за молниевой активностью, то анализ временной изменчивости возможен только по результатам регистрации гроз на метеорологических станциях.

На территории Западной Сибири такую возможность дают только ряды визуальных наблюдений за грозами. К достоинствам визуально-слухового метода следует отнести единую методику определения характеристик грозовой активности на протяжении длительного периода в большинстве стран.

Анализировались данные о среднегодовых значениях температуры воздуха и годовой сумме числа дней с грозой, зарегистрированных на 10 метеостанциях Западной Сибири за период 1966–2023 гг. Для исследования использованы данные ВНИИГМИ-МЦД и климатических справочников.

Методика визуально-слуховой регистрации гроз в период с 1912 г. по настоящее время не претерпела существенных изменений, хотя с 1966 г. грозы не подразделяются на близкие и отдаленные. Если в течение суток наблюдателем отмечался хотя бы один раскат грома, то в оперативном журнале метеорологических наблюдений он зафиксирован как один день с грозой. Наблюдатель регистрирует время начала грозы и время ее окончания и рассчитывает продолжительность явления. Таким образом, грозовая активность, наблюдаемая на метеостанции, как на протяжении месяца, так и грозового сезона в целом характеризуется числом дней с грозой и суммарной продолжительностью гроз.

К достоинствам визуально-слухового метода следует отнести единую методику определения характеристик грозовой активности на протяжении длительного периода в большинстве стран, что позволяет анализировать многолетнюю изменчивость грозовой активности. К недостаткам метода можно отнести различия слуховых и зрительных способностей наблюдателей и точность исполнения ими методических рекомендаций при выполнении наблюдений. Число зарегистрированных дней с грозой зависит, несомненно, от радиуса обзора метеонаблюдателя. Кроме того, существуют помехи, такие как перекрытие ближайшими строениями линии горизонта, наличие сильных световых и звуковых сигналов в ночное время. Эти помехи обусловлены тем, что большинство станций находится

в непосредственной близости от аэропортов и густонаселенных территорий. Помехи непосредственного окружения метеостанций, позволяющие, как правило, допустить наличие ошибок в многолетних рядах наблюдений, составляющих в среднем ± 2 дня с грозой в году [5]. Поскольку конвективный потенциал атмосферы увеличивается с увеличением температуры воздуха, актуально исследовать тенденции среднегодовых значений температуры на территории исследуемой молниевой активности.

Тенденции среднегодовых значений температуры воздуха и числа дней с грозой

Актуальность исследования частоты образования гроз в Западной Сибири и ее изменчивости во времени заключается в том, что их частота на фоне потепления климата увеличивается, а ущерб, причиняемый ими в разных отраслях экономики, будет иметь тенденцию к росту. При увеличении среднегодовой температуры воздуха даже на 1°C количество молний над данной территорией увеличится на 10 % [11]. Атмосфера над Западной Сибирью теплеет и при наличии местных источников влаги становится более влажной, что сопровождается интенсивностью конвективных процессов и увеличением частоты экстремальных погодных явлений, обусловленных ее развитием.

Результаты ряда предыдущих исследований демонстрируют статистически значимый положительный тренд повторяемости кучево-дождевых облаков и отрицательный тренд других рассматриваемых форм облачности над территорией России вообще и территорией Западной Сибири в частности [12, 13]. Замечено, что в годовых суммах осадков на этой территории преобладали ливневые и смешанные осадки, что говорит о высокой повторяемости кучево-дождевых облаков.

Одной из задач представляемых исследований является анализ тенденции среднегодовых значений температуры воздуха (T , $^{\circ}\text{C}$) над разными территориями исследуемого региона.

На рис. 1 представлены изменения средних годовых значений температуры воздуха в районах метеорологических станций Ханты-Мансийск (61° с.ш., 69° в.д.), Колпашево (58°19' с.ш., 82°55' в.д.), Барабинск (55°21' с.ш., 78°21' в.д.) и Томск (56°29' с.ш., 84°57' в.д.).

Статистически значимое увеличение среднегодовых значений температуры (с вероятностью не менее 99 %) зарегистрировано на станциях, расположенных в разных частях исследуемого региона. Величина тенденций на всех станциях исследуемой территории составляет в последнее десятилетие от 0,4° до 0,8°. При этом в 2020 г. среднегодовые значения температуры воздуха на всех станциях исследуемого региона были примерно на 2 °С выше, чем в предыдущие годы (рис. 1), что и вызвало увеличение частоты грозových явлений и выпадения града над данной территорией [14]. Однако в разных регионах влияние последствий потепления климата на грозовую активность могут быть противоположными. Например, с наступлением лета на обширных пространствах европейской территории России почвы иссушаются [1], поэтому и в ряде регионов

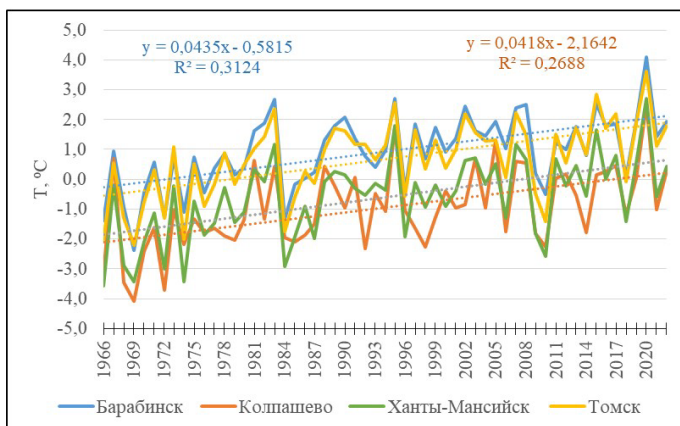


Рис. 1. Изменчивость среднегодовых значений температуры воздуха над северной (ст. Ханты-Мансийск), центральной (ст. Колпашево) и южной (ст. Томск, ст. Барабинск) частями анализируемой территории Западной Сибири

Сибири конвективный потенциал атмосферы может уменьшиться. Известно, что развитие грозы обуславливается совокупностью параметров системы «атмосфера – подстилающая поверхность», и пространственному распределению климатических характеристик грозовой активности свойственна мезомасштабная неоднородность. Даже на фоне одних и тех же синоптических процессов повторяемость гроз над отдельными территориями может в 2 раза превышать средний по региону уровень грозовой активности [15].

Известно, что в Северном полушарии общее число внетропических циклонов увеличилось [1]. Район междуречья Обь–Иртыш, центром которого является большое Васюганское болото, является в последние десятилетия областью активного циклогенеза [16], поскольку представляет собой территорию, на которой расположено около 800 тысяч озер разного размера и множество рек, увеличивающих контрасты температур атмосферы, обуславливаемые разнообразием подстилающей поверхности. Наличие циклонической кривизны формирует конвергенцию горизонтальных приземных потоков воздуха, необходимых для подъема массы достаточно влажного и теплого воздуха восходящими потоками. Этот процесс обеспечивает достаточно быстрое образование конвективной облачности с выделением скрытого тепла и может привести к развитию глубокой конвекции, формирующей грозы и град.

В процессе подготовки материалов для настоящего исследования было проведено сравнение двух баз данных о числе дней с грозой. Первая база была получена из ВНИИГМИ-МЦД и содержала число дней с грозой на станциях Томской области за период с 1966 по 2023 г. Вторая база была сформирована на основе данных журнала «Шторм» Томского ЦГМС (филиал ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС»). Результаты сравнения баз данных приведены на рис. 2.

Поскольку аналогичные различия в данных, взятых из разных источников, обнаружены на нескольких анализируемых станциях, принято решение анализировать тенденции грозо-

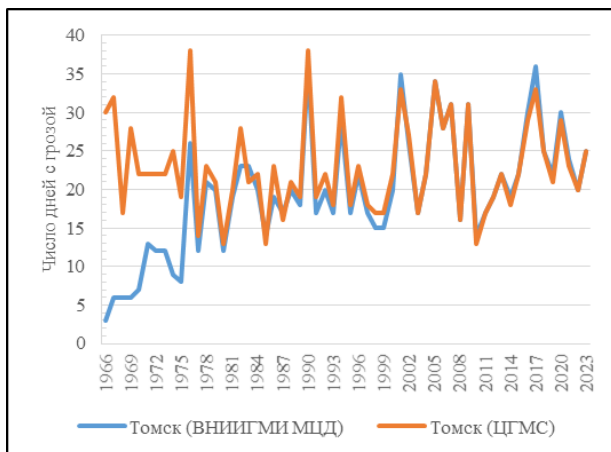


Рис. 2. Число дней с грозой на метеорологической станции Томск в период с 1966 по 2023 г. на основе базы данных ВНИИГМИ МЦД и Томского ЦГМС (филиал ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС»)

вой активности только с 1978 г. Использование для анализа более продолжительного периода не позволит получить достоверные тенденции и выявить периоды цикличности грозовой активности. Поэтому на рис. 3 представлены значения числа дней с грозой в разных районах анализируемой территории только за 46-летний период (1978–2023 гг.).

При этом тенденция статистически значимых увеличений среднегодовых значений температуры наблюдается и за период 1978–2023 гг. с вероятностью не менее 99 %.

Анализируя изменчивость значений суммы числа дней с грозой на территории умеренных широт Западной Сибири, можно убедиться, что эта характеристика в XXI веке пока не выходит за пределы значений, зарегистрированных в предыдущее столетие [5, 6, 11, 17]. Однако тенденция к увеличению числа дней с грозой заметна при анализе данных большинства станций, расположенных на территории исследуемого региона. Возможно, это обусловлено тем, что продолжительность грозового сезона (число дней между первой и последней грозой в году) над Западной Сибирью увеличилась в последнее

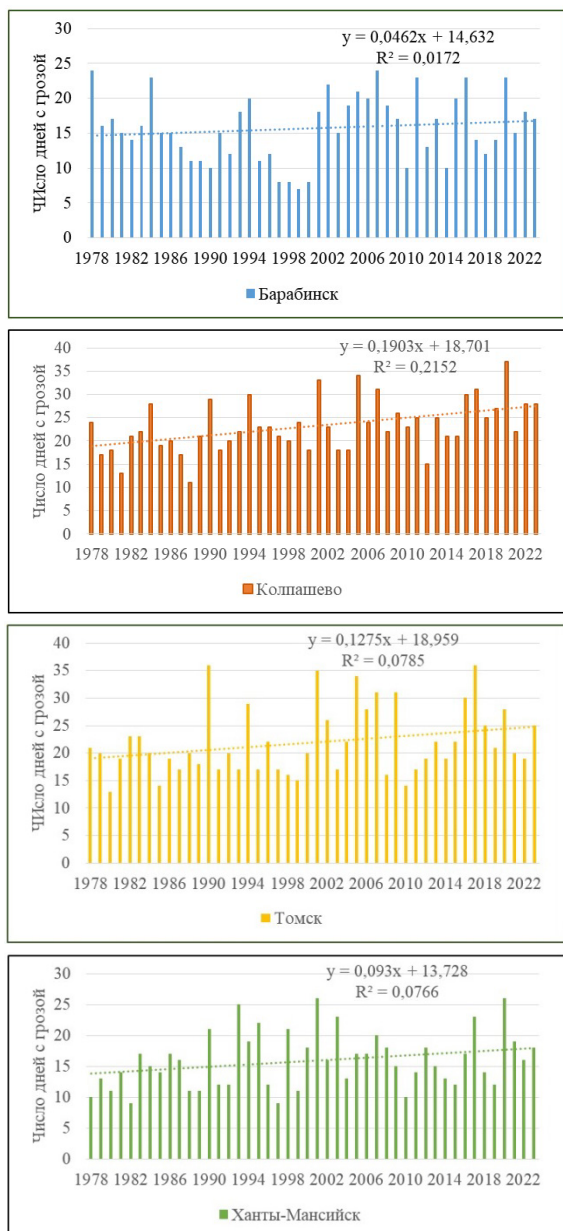


Рис. 3. Число дней с грозой на метеостанциях Западной Сибири и тенденции его увеличения

десятилетие в среднем на 5 дней на уровне 60° с.ш. и на 15 дней на уровне 55° с.ш. [18].

Для оценки статистической достоверности увеличения суммы числа дней с грозой в году за анализируемый период, на основе полученных уравнений и коэффициента детерминации был произведен расчет t-критерия Стьюдента. Сравнение полученных фактических значений t-критерия с табличными значениями по абсолютной величине показало, что с доверительной вероятностью 0,9 все анализируемые ряды числа дней с грозой имеют тенденцию к увеличению, кроме метеорологических станций Барабинск и Кожевниково (56.26° с.ш., 83.97° в.д.), расположенных в южной части исследуемой территории. С доверительной вероятностью 0,95 и выше статистически значимое увеличение числа дней с грозой наблюдается только в районе ст. Колпашево. При этом в последнее десятилетие замечено увеличение количества молний в течение одного дня с грозой [18] и случаев выпадения града [19] на большинстве станций Западной Сибири. Конвективные облачные системы, в которых образуются грозы и град, становятся все более обширными в пространстве, а максимально развитые конвективные ячейки, продуцирующие формирование гроз и града, стали формироваться значительно чаще.

Таким образом, можно предположить, что увеличение числа дней с грозой регистрируется, а происходит оно по двум причинам: увеличение продолжительности грозового сезона и увеличение мощности конвективных облаков. Для понимания процента увеличения молниевых разрядов необходимо оснащение территории грозопеленгаторами.

Цикличность в рядах грозовой активности и среднегодовых значений температуры воздуха

Периодические изменения во временном ходе метеорологических величин подтверждены множеством исследований природных явлений [20, 21], не является исключением и грозовая деятельность. В то же время структура многолетних ко-

лебаний таких метеорологических элементов, как температура воздуха, атмосферные осадки, атмосферная циркуляция, изучена весьма детально и используется в практике долгосрочного прогнозирования, чего нельзя сказать о грозовой активности. Временные ряды характеристик грозовой активности [5, 6, 17] характеризуются сложной статистической структурой. В результате сравнения анализов, проведенных для различных территорий, можно сделать вывод, что над разными территориями наблюдаются циклы и одинаковой, и различной периодичности. Более того, циклы одинакового периода наблюдаются в рядах далеко не всех станций, расположенных в пределах даже территории мезомасштаба (в радиусе около 100 км) [5, 15, 17]. Кроме того, на территории даже одной области или района в рядах наблюдений над грозами могут наблюдаться периоды с различной амплитудой. При этом наличие корреляционной связи временного хода грозовой и солнечной активности наблюдается также не для всех территорий [17].

В настоящем исследовании за анализируемый период изучена цикличность исследуемых временных рядов методами автокорреляции и Фурье [22]. Знание автокорреляционных функций позволяет решить широкий круг задач, связанных с исследованием и прогнозированием изменчивости гидрометеорологических условий. В гидрометеорологии понятие спектра, анализируемого методом Фурье, используется для выделения скрытых периодичностей временного ряда, исследования закономерностей его частотной структуры, при моделировании и прогнозе стационарных процессов.

При анализе данных многолетних наблюдений числа дней с грозой выявлены циклы различной периодичности грозовой активности (табл. 1). Получено, что в базе 46-летних значений исследуемых рядов наибольшее значение спектра, анализируемого методом Фурье, составляют квазидвухлетние вариации, которые обнаруживаются во временном ходе практически всех метеорологических характеристик. Этот цикл и его

возможные причины являются предметом широкого обсуждения, хотя в статистике он относится к «красному шуму», поскольку характерен для случайных процессов.

Одним из самых мощных циклов в гидрометеорологических процессах считается 5–6-летний цикл, который связывают с солнечной активностью (с половиной 11-летнего цикла). Такая цикличность обнаружена в рядах большинства станций исследуемого региона. Однако в рядах среднегодовых значений температуры воздуха преобладает 7-летний цикл.

Циклы длительностью 11–12 лет обнаружены во всех анализируемых рядах температуры воздуха. Практически не подлежит сомнению, что это результат проявления в земных процессах общеизвестного 11-летнего цикла солнечной активности. Однако отметим, что цикл этот чаще всего уступает по амплитуде 6–7-летнему как в рядах температуры воздуха, так и

Таблица 1

Цикличность в многолетних рядах суммы числа дней с грозой в году и среднегодовых значений температуры воздуха за период 1978–2023гг.

Метеостанции	Циклы (число лет)					
	2–3	4–5	6–7	8–9	10–11	12–15
	Цикличность грозовой активности					
Ханты-Мансийск	2	4		9		
Колпашево	3	4	6			12
Томск	2	4	6		11	
Кожевниково	2	4	6			15
Барабинск	2	4		9		12
	Цикличность в рядах температуры воздуха					
Ханты-Мансийск	2	4	7		11	12
Колпашево	2	3	7		11	12
Томск	2	4	7		11	12
Кожевниково	2	4	7		11	12
Барабинск	2	4	7	9		

в рядах числа дней с грозой. Кроме того, существуют районы (северная часть анализируемой территории), где этот цикл не обнаруживается в повторяемости грозовой активности.

Поскольку циклы грозовой активности длительностью 6–7 и 11–12 лет обнаруживаются не над всеми метеорологическими станциями, можно предположить, что влияние местных факторов на грозовую активность в этих районах сильнее.

По амплитуде значений спектральной плотности 3–4-летних цикл на всех территориях выражен наиболее ярко и обусловлен, скорее всего, наличием циклической составляющей в повторяемости синоптических процессов.

Считать полученный результат издержками визуального метода наблюдений над грозами невозможно, поскольку все ряды с наличием сомнительных данных из анализа исключались. Различные возможности для формирования мощной конвекции и гроз наверняка обеспечивают особенности подстилающей поверхности, причем не только орография, но и неравномерность распределения температурно-влажностных характеристик подстилающей поверхности [23].

В результате проведенных исследований получено следующее.

Статистически значимое увеличение среднегодовых значений температуры воздуха (с вероятностью не менее 99 %) зарегистрировано на всех станциях исследуемого региона. Величина тенденций в рядах анализируемых станций составляет в последнее десятилетие от $0,4^{\circ}$ до $0,8^{\circ}$.

С доверительной вероятностью 0,9 все анализируемые ряды числа дней с грозой имеют тенденцию к увеличению, кроме метеорологических станций Барабинск и Кожевниково, расположенных в южной части исследуемой территории. С доверительной вероятностью 0,95 и выше статистически значимое и наибольшее увеличение числа дней с грозой замечено только в районе ст. Колпашево.

Поскольку ввиду увеличения средних годовых значений температуры воздуха увеличилась и продолжительность гро-

зового сезона (число дней между первой и последней грозой в году), возможно, это и способствует увеличению числа дней с грозой в году, особенно в северной части исследуемой территории. Увеличение молниевой активности наблюдается и на фоне увеличения температурно-влажностных характеристик атмосферы, способствующих развитию более мощных конвективных ячеек.

Наибольшая спектральная плотность характерна для периодичности 4–7 лет всех анализируемых рядов, поэтому есть основание предполагать, что на молниевую активность влияет цикличность повторяемости циркуляционных процессов.

Квазицикличность грозовой активности и среднегодовых значений температуры воздуха с периодом 11–12 лет обнаружена над большинством, но не над всеми метеорологическими станциями исследуемого региона. Можно предполагать, что влияние солнечной активности на среднегодовые значения температуры воздуха и на грозовую активность сомнений не вызывает, но над рядом территорий (северная и южная) большее влияние оказывают другие процессы.

Таким образом, анализ рядов числа дней с грозой не позволяет достаточно быстро выявить увеличение грозовой активности над регионом. Наличие тенденций на увеличение молниевой активности на фоне меняющегося климата может быть в первую очередь зарегистрировано грозорегистраторами. Их установка на территории Западной Сибири необходима, поскольку выбор молниезащитных систем только на основе определения числа дней с грозой и суммарной за год продолжительности гроз может привести к росту ущерба для ряда отраслей экономики.

Литература

1. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Научное издательство «Лань», 2022. 124 с.
2. Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Козлов Ф.А., Коршунова Н.Н., Курганский М.В., Мохов И.И., Семенов В.А., Швець Н.В., Ши-

- хов А.Н., Ярынич Ю.И. Опасные атмосферные явления конвективно-го характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 27–41.
3. Горбатенко В.П., Дульзон А.А., Решетько М.В. Пространственные и временные вариации грозовой активности над Томской областью // Метеорология и гидрология. 1999. № 12. С. 21–28.
 4. Горбатенко В.П., Дульзон А.А. Результаты исследования грозовой активности над территорией Томской области // Изв. ТПУ. 2006. № 2. С. 126–129.
 5. Горбатенко В.П., Ершова Т.В. Молния как звено глобальной электрической цепи. Томск : Изд-во ТГПУ, 2011. 204 с.
 6. Адаменко М.Ф., Алехина Н.М., Горбатенко В.П., Задде Г.О., Кабанов М.В., Катаев С.Г., Комаров В.С., Кусков А.И., Нарожный Ю.К., Окишев П.А., Русанов В.И., Сальников В.Н., Шитов А.В., Шишлов В.И. Региональный мониторинг атмосферы. Часть 4. Природно-климатические изменения : Коллективная монография / под общ. ред. М.В. Кабанова. Томск : МГП «Раско», 2000. 270 с.
 7. Горбатенко В.П., Кужевская И.В., Пустовалов К.Н., Чурсин В.В., Константинова Д.А. Оценка изменчивости конвективного потенциала атмосферы в условиях изменяющегося климата Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 108–117.
 8. Нечепуренко О.Е., Кужевская И.В., Пустовалов К.Н., Горбатенко В.П., Кравец К.А. Грозовая активность и характеристика неустойчивости атмосферы по данным реанализа ERA5 над азиатской частью Арктического сектора России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2023. № 4 (390). С. 25–45.
 9. Нечепуренко О.Е., Горбатенко В.П., Пустовалов К.Н., Громова А.В. Грозовая активность над Западной Сибирью // Геосферные исследования. 2022. № 4. С. 123–134
 10. Konstantinova D.A., Gorbatenko V.P., Polyakov D.V. Spatial distribution of the thunderstorm activity characteristics for the territory of Western Siberia // Proc. SPIE: 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 30 November 2017. Vol. 10466. P. 1046658. DOI: 10.1117/12.2285994
 11. Rakov V.A., Uman M.A. Lightning: Physics and Effects. Cambridge : Cambridge University Press, 2003. 687 p.
 12. Нечепуренко О.Е., Горбатенко В.П., Константинова Д.А., Севастьянов В.В. Индексы неустойчивости атмосферы и их пороговые значения, оптимальные для прогноза гроз над Сибирью // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2 (368). С. 44–59.
 13. Кужевская И.В., Горбатенко В.П., Носырева О.В., Волкова М.А., Нечепуренко О.Е., Чурсин В.В., Черedyко Н.Н. Агроклиматические характеристики земель сельскохозяйственного назначения на территории Сибирского Федерального округа в условиях изменения климата // Метеорология и гидрология. 2023. № 10. С. 77–87.

14. Горбатенко В.П., Пустовалов К.Н., Громова А.В., Нагорский П.М. Опасные конвективные явления над Западной Сибирью в XXI веке // Доклады Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Нальчик, 2021. С. 455–460.
15. Ершова Т.В., Горбатенко В.П. Параметры молниевой активности по инструментальным измерениям // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2011. № 5 (107). С. 150–154.
16. Горбатенко В.П., Тунаев Е.Л., Пустовалов К.Н., Волкова М.А., Нечепуренко О.Е. Изменения циклогенеза над Западной Сибирью в 1976–2017 гг. // Фундаментальная и прикладная климатология. 2020. Т. 2. С. 35–57.
17. Горбатенко В.П. Структура временных рядов числа дней с грозой // Оптика атмосферы и океана. 2000. № 11. С. 1026–1029.
18. Горбатенко В.П., Громова А.В., Журавлев Г.Г. Грозовая активность над Западной Сибирью // ENVIROMIS 2022. Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды. Томск : Томский центр научно-технической информации, 2022. С. 339–341.
19. Горбатенко В.П., Ананова Л.Г., Апостолиди Х.Т., Карпова А.А. Аэросиноптические условия образования града над юго-востоком Западной Сибири // Труды Сибирского регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института : Сборник статей. 2023. Вып. 108. С. 17–28.
20. Башкирцев В.С., Машинич Г.П. Солнечная активность и изменения климата Земли // Солнечноземная физика. 2005. Вып. 8. С. 179–181.
21. Кондратьев К.Я. Глобальные изменения климата: данные наблюдений и результаты численного моделирования // Исследование Земли из космоса. 2004. № 2. С. 61–96.
22. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации : учебник. Т. 2. Анализ временных рядов и случайных полей. 2-е изд. СПб. : РГГМУ, 2020. 196 с.
23. Горбатенко В.П., Дульзон А.А. Влияние изменения подстилающей поверхности на грозовую активность // География и природные ресурсы. 1997. № 2. С. 142–146.

**КВАНТИЛЬНО-КЛИМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
ГОДОВОГО ХОДА ТЕМПЕРАТУРЫ И ТЕХНОЛОГИЯ
ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ОПЕРАТИВНОМ
МЕТЕООБЕСПЕЧЕНИИ**

В.М. Токарев

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

Предложена алгоритмическая основа расчетов, графического представления и анализа годового хода температуры с квантильными границами относительно средних и медиан. Представлены расчетные варианты терминологической интерпретации квантильных интервалов в медийном пространстве и оперативном метеообеспечении.

Ключевые слова: температура, годовой ход, квантильно-климатический анализ, метеообеспечение

**QUANTILE-CLIMATIC ANALYSIS OF THE ANNUAL
TEMPERATURE CYCLE AND THE TECHNOLOGY
OF ITS USE IN OPERATIONAL METEOROLOGICAL
SUPPORT**

V.M. Tokarev

Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute, Novosibirsk

An algorithmic basis for calculations, graphical representation and analysis of the annual temperature cycle with quantile boundaries relative to averages and medians is proposed. Calculated variants of the terminological interpretation of quantile intervals in the media space and operational meteorological support are presented.

Keywords: temperature, annual cycle, quantile-climatic analysis, meteorological support

1. Варианты квантильных градаций представления вероятностей

Разделение плотности вероятности (частот) распределения на диапазоны группировки — вообще говоря, рутинная задача, определяемая целью агрегирования информации. Для анализа гистограмм обычно используются равные интервалы шкалы исследуемой (квази)случайной характеристики. А максимум информационной энтропии сохраняется при равночастотном разбиении.

Поставим задачу оптимального частотного (вероятностного) представления климатической информации. Приоритет будем отдавать медийной стороне задачи, поскольку для справочно-табличных данных не столь актуальны ограничения на степень агрегирования и визуальное восприятие больших объемов информации. Медийное же информационное пространство, к сожалению, захвачено всевозможными климатическими и просто «нормами» и «рекордами», причем термину «норма» приписываются многолетние средние, т.е. 30–50-летние константы места и времени года! Значит, все, что от этого числа отклоняется, «ненормально».

Ситуация с терминологией удивительно запущена, и не видно признаков и желающих ее исправлять. Собственно, абсурдность «ненормальности» изменчивости погоды не требует доказательств. И если запретить медийно-раскрученный термин «норма» не так просто, как тратить йодистое серебро на засев «поля чудес в Стране Облаков», то хотя бы жестко ограничить его применение частотным (вероятностным) диапазоном, например 30-процентным вокруг среднего (лучше медианы), можно и нужно. Варианты могут быть разные, но принципиально-медийные ограничения — это простота и наглядность восприятия. Важно найти баланс между простотой и информативностью, эмоциями и смыслом.

Сначала откажемся от привычного двоично-десятичного деления — пополам, на четверти и далее до 5 и 1 %. Просто потому, что не очень подходят десятичные симметрии для вы-

деления центральной частотной зоны. Простые дроби представляются более естественными. Итак, самый простой и элегантный вариант — «три третьих». Середина и края — все по $1/3$. Поскольку слово «норма» мы отправили туда, откуда оно в статистику и пришло, — в теорию ошибок, для которой и было выведено «нормальное» симметричное распределение (случайных) ошибок, то нашу центральную треть можно называть обычной, типичной и прочими эпитетами, за редкостью применения в русском языке прилагательного «частый». Тогда ее соседями будут просто нижняя и верхняя трети. Легко, красиво, удобно, но детали пока недостаточно.

2. Третичный вариант вероятностных градаций

Вариант «три третьих» — это только красивая симметричная начальная база трех равных градаций. Очевидно, что без центра симметрии не обойтись, значит, центральная треть будет состоять из $-1/6$ и $+1/6$, разделенных медианой. Здесь придется снова посетовать на засилие не только «норм» и стоящих за ними «средних». Как и сама «норма», «среднее» также тяготеет к распределению Гаусса с соавторами. Этимология слова очевидна — это середина чего-то, и только самые привередливые заметят, что это центр тяжести плеча грузами со всеми сопутствующими плюсами и минусами. Еще раз придется вернуться к истокам «нормо-средних», там и средние — просто находка, поскольку большие ошибки с большим весом легче выделяются и исправляются. Еще лучше — со среднеквадратическим (это даже не просто «норма», а «стандарт»!) отклонением, поскольку ошибка в квадрате — это путь к решению систем опять же «нормальных» линейных уравнений для нахождения орбит планет, измеренных в точках с ошибками. Решений получается много, но и тут — эврика! — берут единственное решение с минимальной нормой!

А у нас вместо ошибок — погода! Очень изменчивая субстанция, заведенная турбулентностью. Норм нет, стандартов нет, средние — не центры симметрии. От дисперсий все равно

никуда не деться. Но начнем с медианы, поскольку именно она, а не среднее, точно разделит наши климатические и погодные выборки данных 50 на 50 %, не реагируя на величину отклонения от медианного порога. А вокруг нее в нашей третичной схеме будут дробные симметричные зоны произвольной детальности (наполненности):

$$\begin{aligned} & -2 \quad -1 \quad 0 \quad +1 \quad +2 \\ & -1/6 \quad [-1/6 \quad \{-1/6 + 1/6\} + 1/6] + 1/6 \end{aligned}$$

Вот 5 категорий, всё красиво — центральная симметрия, безымянная интерпретация: нулевая треть, плюс-минус первый уровень, плюс-минус второй уровень от средней трети.

Но если хочется уточнить экстремальные случаи, то можно, не нарушая третичный подход, разделить второй уровень в пропорции 2/3 и 1/3 с наполняемостью $\pm 1/9$ и $\pm 1/18$ или в процентах около 11 и 6 %. Это почти привычные статистические 5 % с сохранением триметрии.

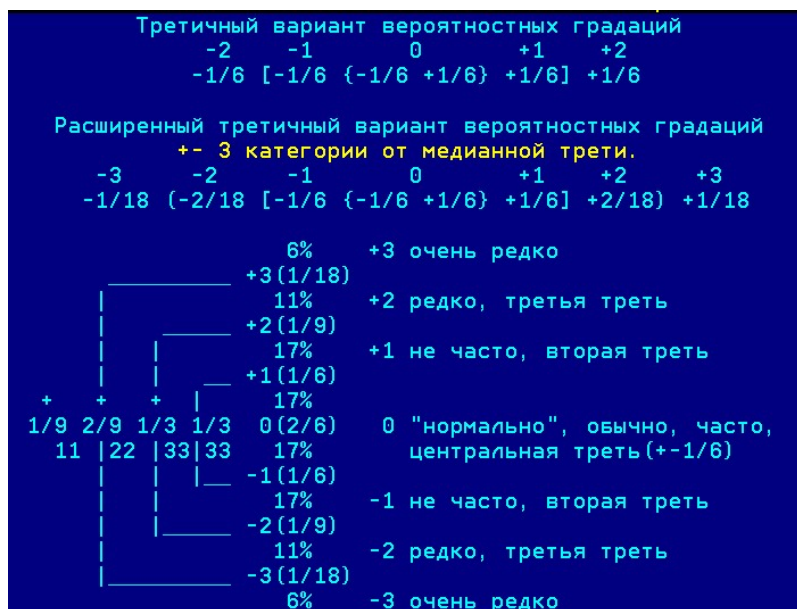


Рис. 1. Третичный вариант вероятностных градаций

Еще раз вернемся к первой алгоритмической развилке: медиана — среднее, дробные квантили — сигмы (среднеквадратические отклонения). Разница принципиальная. Произвольные квантили вокруг медианы просто описывают эмпирические частоты данной выборки любой формы (гистограмма). Алгоритмически главная операция — сортировка для получения вариационного ряда, дальше любые квантили получаются выбором квантильного элемента-порога сравнения. А среднее и сигма — это параметры симметричной колоколообразной функции, приближенной по двум параметрам к вашей выборке. Самое распространенное несовпадение эмпирического распределения с «нормальностью» — это нарушение (или же это свойство!) симметрии. Эмпирическим медианам-квантилям это безразлично до разумных пределов. Возможно, некоторых читателей озадачит интерпретация центров симметрии эмпирического распределения: симметрия относительно среднего — равенство СУММ всех значений слева и справа — симметрия относительно медианы — равенство ЧИСЛА меньших значений слева и больших справа.

Рассмотренные различия параметров скажутся на представленных графиках. Но остался еще один методический нюанс — представление пространственно-временной детальности эмпирических статистик.

3. Как рождаются «шумные» рекорды

Представления метеоролога-прогнозиста-информатора и клиента-потребителя медийного пространства о предмете (погода–климат) схожи с размерами ворот глазами вратаря и бьющего пенальти.

Стало модным почти все цифры фактической погоды сопровождать комментарием о разнице с «нормой» (иногда «климатической»). Совсем риторический вопрос «слушателя»: а эти «на 3 или 7 градусов выше/ниже» — это как? Много, мало...? А четверть месячной «нормы» дождя за сутки — это уже эвакуироваться? Или можно на крыше пересидеть? И никто не

ответит, потому как время-место каждого такого «события» надо сравнивать не просто со средним — 30-летним, а с квантильной вероятностью такого отклонения в этом месяце-декаде (но не дне года!) и очертить пространственные границы, внутри которых этот локальный для конкретной станции факт будет репрезентативным. Впрочем, после такого развернутого «научного» ответа вас на радио и ТВ больше не позвуют.

Так как же представить-довести климатическую информацию до медийного потребителя, чтобы не оттолкнуть сложностью, терминологией, а главное — определить, на какую реакцию рассчитана именно климатическая ссылка? Варианты:

- напугать (нужно медиаресурсам?),
- предупредить об опасности (это уже ОЯ?),
- успокоить — лучший вариант,
- подать как любопытную/интересную информацию.

Во-первых, прекратить искать мусорные «рекорды» для отдельных дней года. Это не украшает серьезные метеорологические издания и медийные ресурсы. Размах колебаний температуры умеренных широт по суткам года многолетнего архива превышает 30 °С, и годов осреднения не хватает выровнять волны синоптического и макро масштабов. В результате высокочастотный (1–5 суток) случайный шум архива (30-летние экстремумы по каждому суткам отдельно) становится участником «игры в рулетку на рекорды»: в каждый день года хоть на одной метеостанции да найдется какой-нибудь «рекорд» или редкое значение/явление, не несущее никакой смысловой нагрузки, зато могут использоваться для раздувания «глобального помутнения».

Стоит обратить внимание на цветовые градации комфортности/частотности/редкости, а не только опасности, а главное — обратиться к универсальным сравнимым показателям, таким как архивная вероятность отклонения со знаком и смещение по годовому ходу вперед-назад, представляемым в наглядной или устной форме.

4. Примеры комплексного представления совмещенной текущей информации на фоне климатического суточно-годового хода температуры с цветовыми квантильными зонами

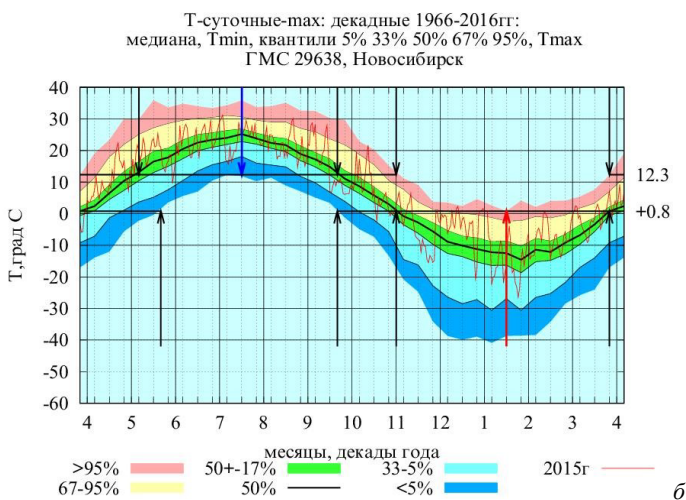
По 50-летним архивным данным Новосибирска (1966–2015 гг.) рассчитаны квантильные зоны редуцированного до \pm двух уровней третичного варианта с объединением 1-го и 2-го уровней и выделения 6%-й зоны экстремумов (рис. 2, 3). Графики дополнены стрелочными пояснениями сравнительного анализа редких и оригинальных климатических характеристик и оформлены в яркой медийной палитре [1, 2].

На всех четырёх графиках представлены 50-летние (1966–2015 гг.) квантильные годовые ходы суточных максимумов и минимумов температуры в Новосибирске в сравнимых вариантах $\pm 1,2$ сигмы от среднего (рис. 2, *а*) и описанной выше редуцированной третичной медианной схемы с квантилями вариационного ряда (рис. 2, *б*, 3, *а*, 3, *б*).

На графиках много разной дополнительной информации, полученной именно в результате визуального анализа. А для оперативного использования такого климатического комплекса нанесён последний 2015 г. (рис. 2) — тонкая красная ломаная, которая имитирует ежесуточное оперативное продление наложенного графика с визуальным отслеживанием изменения цветового уровня в медийных целях. Хорошо видна климатически теплая зима 2015 г.

Другой вариант представления текущей температуры — бинарная цветовая заливка выше и ниже медианы (рис. 3) наглядно показывает макросиноптические волны тепла и холода. Особенно впечатляет декабрьская макроволна холода — больше двух недель и около недели ниже -30°C .

Важный результат сравнения квантилей по параметрам нормального распределения (рис. 2, *а*) и непараметрического



варианта квантилей вариационного ряда (рис. 2, б). Видно, как параметрический подбор местами совсем теряет зону экстремумов, а также имеет неизбежные различия средней с медианой, которая сама по себе является истинной 50%-й квантилью.

– обращают внимание площадки максимальных температур, причем если зимой это могут формировать фазовые переходы воды вблизи 0°C , то летом «ограничение» $+33\text{--}35^{\circ}\text{C}$ может быть связано с максимумом грозо-ливневой активности;

Что можно получать из графиков:

– концы красной и синей стрел указывают на минимаксные экстремумы: максимальный за 50 лет (-4.1°C) зимний суточный минимум (середина января) и минимальный за 50 лет (6.9°C) летний суточный минимум (середина июля);

– каждый вертикальный экстремум можно оценить не только по квантильной цветовой вероятности, но и сместиться по горизонтали до медианы и посмотреть день-месяц климатического сдвига по годовому ходу. Так, рассмотренный выше зимний максимум (-4.1°C) соответствует сдвигам на 2.5 месяца назад (начало ноября) и вперед к началу апреля.

– изотермы, пересекающие квантильные зоны, показывают сезонный интервал, когда в году бывает данная температура;

– ну и главная оперативная функция — оперативно обновлять на графике точки текущей минимальной и максимальной температуры и видеть-показывать цвет текущей квантильной вероятностной зоны.

Квантильные категории универсальны и уравнивают все и везде. Они просто приводят все отклонения от медианы к единому, легко запоминаемому цветовому масштабу вероятностей.

Очень важно также с помощью графика наглядно оценивать-сравнивать масштабы суточно-годового хода температуры и мощной изменчивости синоптического масштаба.

И итоговый вывод — только универсальный вероятностный масштаб позволяет сравнивать изменчивость, оценивать даже несравнимое в категориях «много» или «мало».

Литература

1. Разработка алгоритмов и технологии расширенной статистической обработки климатической и оперативной метеоинформации,

численные оценки пространственно-временной изменчивости характеристик погоды (параметров атмосферы) во всем диапазоне метеорологических масштабов : Отчет о НИР (промежут.) / ФГБУ «СибНИГМИ»; шифр темы 1.2.7; рук. В.М. Токарев. Новосибирск, 2022. 23 с. Рег. № НИОКТР АААА-А20-120031790056-0. Рег. № ИКРБС 222120900004-2.

2. Разработка алгоритмов и технологии расширенной статистической обработки климатической и оперативной метеоинформации, численные оценки пространственно-временной изменчивости характеристик погоды (параметров атмосферы) во всем диапазоне метеорологических масштабов: Кн. 7 // Отчет о НИР по теме 1.2 «Развитие методов и технологий метеорологических, гидрологических и агрометеорологических прогнозов, оценки состояния и загрязнения окружающей среды для повышения качества гидрометеорологического обслуживания УГМС региона Урала и Сибири», подтема 1.2.7 (закл.) / ФГБУ «СибНИГМИ»; отв. исп. В.М. Токарев. Новосибирск, 2024. С. 552–604. Рег. № НИОКТР АААА-А20-120013090028-0. Рег. № ИКРБС 225012402520-5.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИКЛОНОВ И АНТИЦИКЛОНОВ, ИХ СЕЗОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ РЕАНАЛИЗОМ В КОНЦЕ XX – НАЧАЛЕ XXI В.

Н.В. Поднебесных

*ФГБУН «Институт мониторинга климатических
и экологических систем СО РАН», Томск*

Работа посвящена изучению изменений характеристик циклонов и антициклонов над территорией Сибири, ограниченной координатами 50°–70° с.ш., 60°–110° в.д., для климатически значимого временного периода с 1976 по 2018 г. в разные сезоны года по данным приземных синоптических карт и карт, построенных с помощью реанализа и обработанных посредством мануального трекинга. Рассмотрена изменчивость количества, величины давления в центре (гПа) и продолжительности воздействия (сутки) барических образований, а также их траектории движения над выделенной территорией как в течение года, так и в разные сезоны. Получено, что число циклонов и антициклонов за изученный период увеличилось, а продолжительность уменьшилась, давление в центрах циклонов уменьшилось, а в центрах антициклонов увеличилось. В сезонном распределении основные изменения характеристик барических образований в холодный период обусловлены господством Азиатского антициклона над Сибирью, а в теплый период года изменением температурных контрастов. Было установлено, что реанализ адекватно отражает качественную картину временной изменчивости характеристик циклонов и антициклонов, однако воспроизведение реанализом данных приземных синоптических карт показало некоторые различия в величине.

Ключевые слова: циклоны, антициклоны, многолетняя динамика, сезонные особенности, приземные синоптические карты, реанализ, Сибирь

VARIABILITY OF CHARACTERISTICS OF CYCLONES AND ANTICYCLONES, THEIR SEASONAL FEATURES AND REPRODUCTIONS BY REANALYSIS IN THE LATE XX – EARLY XXI CENTURIES

N.V. Podnebesnykh

*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian
Branch of the Russian Academy of Sciences (IMCES SB RAS), Tomsk*

The paper is devoted to studying changes in the characteristics of cyclones and anticyclones over the territory of Siberia, limited by coordinates 50°–70° N, 60°–110° E, for a climatically significant time period from 1976 to 2018 in different seasons of the year based on surface synoptic maps and maps constructed using reanalysis and processed by manual tracking. The variability of the number, value of pressure in the center (hPa) and duration of influence (day) of baric formations, as well as their trajectory of movement over the selected territory, both during the year and in different seasons, is considered. It was found that the number of cyclones and anticyclones over the studied period increased, and their duration decreased, the pressure in the centers of cyclones decreased, and in the centers of anticyclones it increased. In the seasonal distribution, the main changes in the characteristics of baric formations in the cold period are induced by the dominance of Siberian high over Siberia, and in the warm period of the year, by changes in temperature contrasts. Reanalysis adequately reflects the qualitative picture of the temporal variability of the characteristics of cyclones and anticyclones, but the reproduction of surface synoptic maps by reanalysis showed some differences in magnitude it was found.

Keywords: cyclones, anticyclones, seasonal features, surface synoptic maps, reanalysis, Siberia

Введение

Изменчивость и аномальность погодных условий любого региона определяется крупномасштабными атмосферными вихрями. Прохождение циклонов связано с локальными изменениями температуры, осадков, облачности и ветра, прохождение подвижных антициклонов сопровождается длительными периодами малооблачной и сухой погоды в регионе [1], а ма-

лоподвижные блокирующие антициклоны могут вызывать длительные периоды жары или холода [2]. В течение года характеристики барических образований существенно отличаются, поэтому их изучение в разные сезоны года представляет теоретический и практический интерес.

Вопросам многолетней сезонной изменчивости крупномасштабной циркуляции посвящено ряд работ. Авторами [3] были проанализированы деятельность барических образований в зимний период и их взаимодействие с региональным характером циркуляции атмосферы, характеризующимся стационарным Сибирским максимумом. Были выявлены постоянное ослабление как циклонов, так и антициклонов между 1990-ми и началом 2000-х годов и ярко выраженное усиление антициклонической активности впоследствии. А в работе [4] были изучены особенности зимней циркуляции в районе Азиатского антициклона, авторами которой было отмечено влияние арктических вторжений и процессов, развивающихся в субтропических и тропических широтах. В работе [5] обнаружены вековые и декадные изменения в повторяемости циклонов, их интенсивности, времени жизни и скорости углубления в зимний период. В [6] была изучена климатология зимних антициклонов, а в [7] было отмечено увеличение интенсивных циклонов в северном полушарии в зимний период. В описанных работах широко представлена зимняя циркуляция, летней или сезонной циркуляции посвящено небольшое количество работ, и в связи с этим представляет интерес анализ многолетней динамики изменения ряда характеристик как циклонов, так и антициклонов во все сезоны года.

Исследования циклонической и антициклонической активности, основанные на данных реанализа, проводятся регулярно [5, 6, 8, 9]. В них изучаются закономерности изменения вихревой активности как для полушария в целом, так и для отдельных регионов. Такие работы представляют интерес, поскольку данные реанализа имеют ряд преимуществ [10], но так как они зависят от свойств гидродинамической модели, следу-

ет выполнять сопоставление полученных рядов с эмпирическими данными [11]. Такое сопоставление важно для получения объективной оценки возможности использования результатов реанализа для определенного класса задач, а также для выявления ограничений их использования.

В работе проводился сравнительный анализ характеристик циклонов и антициклонов над территорией Сибири за период 1976–2018 гг. по данным приземных синоптических карт и карт, построенных с помощью реанализа в разные сезоны года.

Исходные материалы и методика исследования

Для анализа параметров атмосферной циркуляции над Сибирью за 1976–2018 гг. использовались срочные синоптические карты AT_{1000} за основные метеорологические сроки (00, 06, 12, 18 ч СГВ) с последующей ручной обработкой (мануальным трекингом). В выбранном для исследования районе (50° – 70° с.ш., 60° – 110° в.д.) отслеживались траектории движения центров барических образований (направление и повторяемость), давление в их центрах (гПа) и продолжительность влияния на исследуемую территорию (сутки).

В качестве циклона (антициклона) рассматривалась область пониженного (повышенного) давления при наличии хотя бы одной замкнутой изобары с характерной циркуляцией и структурой метеорологических полей. Результаты анализа вышеперечисленных характеристик вихрей, полученных с помощью приземных синоптических карт, сравнивались с результатами, полученными с помощью карт геопотенциала на уровне 1000 гПа, построенных на основе данных реанализа NCEP/DOE AMIP-II 1979–2011 гг. [12], JRA-55 2012–2015 гг. [13] и Era Interim 2016–2018 гг. [14]. Оценкам погрешностей в определении циклонов и антициклонов методами автоматического трекинга посвящена статья [15].

Методика мануального трекинга заключалась в последовательном анализе оператором 6-часовых карт AT_{1000} [16]. Положение барического образования на карте определялось ви-

зуально по конфигурации первой замкнутой изобары. Циклон или антициклон принимался в обработку, если его центр находился в пределах выделенной территории, либо его центр располагался вне пределов выделенной для исследования территории, но его хорошо развитая периферия занимала не менее 25 % площади изучаемого региона.

При применении метода мануального трекинга возникает вопрос о достоверности получаемых результатов, как и при любом другом методе анализа. Оценкам погрешностей определения циклонов методами автоматического трекинга посвящена работа [15]. В ней показано, что применение 15 различных методик трекинга зимних циклонов Северного полушария за 1989–2009 гг. на одной и той же базе данных реанализа ERA-Interim приводит к существенным различиям в числе циклонов, с немного лучшими оценками для глубоких циклонов.

Характеристики циклонов и антициклонов, анализируемые в работе, получены одним оператором. Для определения допускаемой индивидуальной ошибки была реализована методика, описанная в работе [17]. В работе [18] приведена классификация циклонов и антициклонов по траекториям их вхождения на исследуемую территорию.

Многолетняя изменчивость характеристик циклонов и антициклонов и их воспроизведение реанализом

Анализ данных приземных синоптических карт и карт, полученных с помощью реанализа для территории Сибири, показал превышение количества барических образований по данным приземных синоптических карт над барическими образованиями по данным реанализа в 1,2 раза (рис. 1, табл. 1).

За период с 1976 по 2018 г. на территории Сибири зафиксировано 2315 циклонов и 1827 антициклонов по данным приземных синоптических карт, 2003 циклона и 1472 антициклона по данным реанализа. Среднегодовое количество циклонов

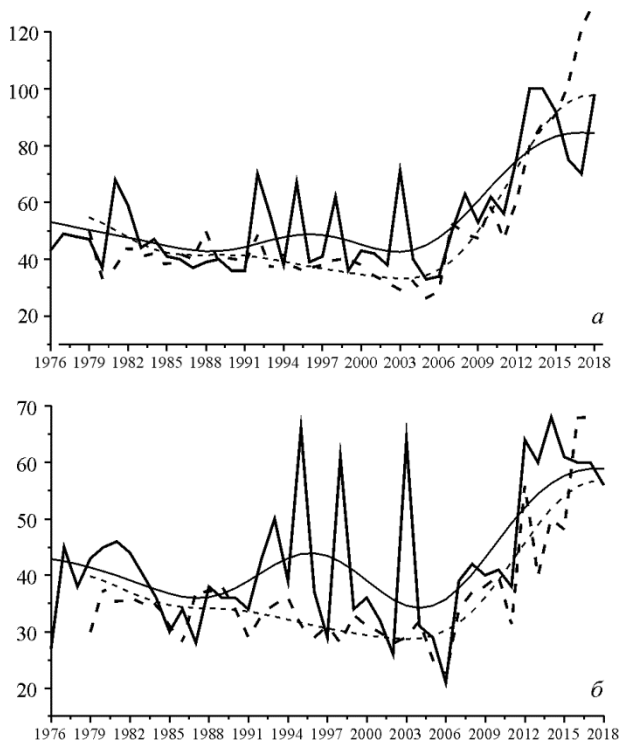


Рис. 1. Количество барических образований (циклонов (а), антициклонов (б)) по данным приземных синоптических карт (сплошная линия) и данным реанализа (прерывистая линия) над Сибирью за период 1976–2018 гг. Здесь и на других рисунках плавные кривые — сглаженные 10-летним окном значения

за период исследования по данным приземных синоптических карт равно 54 ($\sigma = 18,8$, σ — стандартное отклонение), по данным реанализа 50 ($\sigma = 24,4$) (рис. 1, а); антициклонов 42 ($\sigma = 12,4$) и 37 ($\sigma = 10,9$) соответственно (рис. 1, б).

При изучении траекторий движения барических образований было получено, что по данным приземных синоптических карт наибольшее количество циклонов вторгалось на исследуемую территорию по северо-западным траекториям (563), а по данным реанализа — по западным (476), и наименьшее их количество вторгалось по южным траекториям, по данным обо-

их анализов (245 и 242 соответственно). Наибольшее количество антициклонов по данным приземных синоптических карт вторгалось по западным траекториям (450), по данным реанализа — по юго-восточным (357), наименьшее их количество вторгло по северо-западным траекториям, по данным обоих анализов — 211 и 196 соответственно (табл. 1).

Таблица 1

Суммарное количество (n), среднее многолетнее давление в центрах ($P_{ц}$) и средняя продолжительность воздействия (t) циклонов и антициклонов, вторгавшихся на территорию Сибири по различным траекториям движения по данным синоптических карт и реанализа в 1976–2018 гг.

Траектория движения	Циклоны					
	Приземные синоптические карты			Реанализ		
	n	$P_{ц}$	t	n	$P_{ц}$	t
С	343	995,6	6,0	304	991,9	6,6
СЗ	563	993,3	8,1	362	989,5	7,8
З	512	998,3	6,4	476	994,1	6,5
ЮЗ	281	1000,1	5,1	335	997,3	5,5
Ю	245	1002,3	4,5	242	998,7	5,9
местные	371	1011,1	2,7	284	1008,1	2,9
Траектория движения	Антициклоны					
	Приземные синоптические карты			Реанализ		
	n	$P_{ц}$	t	n	$P_{ц}$	t
С	396	1029,5	8,4	312	1026,8	8,9
СЗ	211	1031,5	9,1	196	1027,5	9,2
З	450	1028,9	9,6	295	1026,1	8,9
ЮЗ	346	1030,1	7,7	312	1027,5	8,8
ЮВ	424	1036,3	8,7	357	1029,1	6,8

Примечание. n — число циклонов и антициклонов; $P_{ц}$ — давление в центрах циклонов и антициклонов; t — продолжительность воздействия циклонов и антициклонов.

На рис. 1 видно увеличение количества барических образований в 2012–2018 гг. Проведенный анализ показал, что основной вклад в увеличение количества как циклонов, так и антициклонов внесли барические образования, смещающиеся по западным, реже северным и юго-западным траекториям движения. Это указывает на устойчивость зонального переноса с нарушением зональности в указанные годы на территории Сибири.

Для многолетнего количества как циклонов, так и антициклонов по данным как приземных синоптических карт, так и реанализа отмечается положительный значимый тренд на уровне значимости $\alpha < 0,05$ (0,83 и 1,28 циклона/год соответственно и 0,40 и 0,49 антициклона/год соответственно).

Изучение многолетней изменчивости величины атмосферного давления в центрах барических образований (рис. 2) показало, что в 1976–2018 гг. среднее многолетнее значение в центрах циклонов по данным приземных синоптических карт составляло 1000,1 гПа (варьируясь в пределах 989,6–1006,0 гПа), а по данным реанализа — 996,6 гПа (992,1–1000,7 гПа). Средняя многолетняя величина давления в центрах антициклонов по данным приземных синоптических карт составляла 1031,3 гПа (1026,3–1040,5 гПа), а по данным реанализа — 1027,4 гПа (1022,9–1035,8 гПа).

Для территории Сибири наиболее глубокими являлись циклоны, имеющие северо-западные траектории движения, как по данным приземных синоптических карт, так и по данным реанализа (993,3 и 989,5 гПа соответственно), наименее глубокими — местные циклоны (1011,1 и 1008,1 гПа соответственно). Местные циклоны имеют достаточно высокое давление, но это не вызывает удивления, поскольку они являются неглубокими барическими образованиями с небольшой продолжительностью жизни. Наиболее высокими были антициклоны, смещавшиеся по южным траекториям движения (1036,3 и 1029,1 гПа соответственно), а наименее высокими — западные

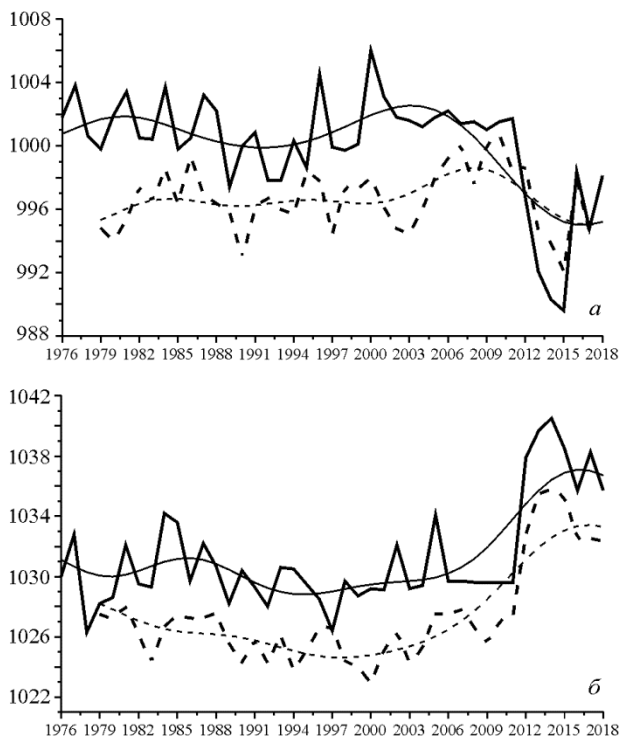


Рис. 2. Давление в центрах (гПа) барических образований (циклонов (а), антициклонов (б)) по данным приземных синоптических карт (сплошная линия) и данным реанализа (прерывистая линия) над Сибирью за период 1976–2018 гг.

антициклоны (1028,3 и 1026,1 гПа соответственно), по данным обоих анализов (табл. 1).

По данным приземных синоптических карт тренд среднего многолетнего давления в центрах циклонов отрицательный ($-0,12$ гПа/год), значимый на уровне $\alpha < 0,05$, по данным реанализа тренд положительный и незначимый ($0,01$ гПа/год). Тренд среднего многолетнего давления в центрах антициклонов как по данным приземных синоптических карт, так и по данным реанализа положительный значимый — $0,14$ и $0,16$ гПа/год соответственно.

Изучая многолетний ход давления в центрах барических образований, можно выделить тот факт, что во второй половине рассматриваемого периода величина давления в центрах циклонов по данным приземных синоптических карт ниже, чем в первой половине, а по данным реанализа несколько выше; величина давления в центрах антициклонов во второй половине рассматриваемого периода несколько выше, чем в первой половине, по данным обоих анализов (рис. 2, *а, б*). То есть во второй половине исследуемого периода циклоны по данным приземных синоптических карт стали более глубокими, а по данным реанализа менее глубокими, а антициклоны более интенсивными, как по данным приземных синоптических карт, так и по данным реанализа.

Анализ средней многолетней продолжительности воздействия барических образований на исследуемую территорию показал, что для циклонов она составляла 6 сут ($\sigma = 1,4$) по данным приземных синоптических карт и 7 сут ($\sigma = 2,4$) по данным реанализа (рис. 3, *а*). Средняя продолжительность антициклонов составляла 9 сут ($\sigma = 2,6$) по данным приземных синоптических карт и 11 сут ($\sigma = 2,6$) по данным реанализа (рис. 3, *б*). Проведенные расчеты показали, что в среднем в течение года антициклональная погода наблюдалась над территорией Сибири чаще, чем циклоническая, поскольку средняя годовая продолжительность общего воздействия на исследуемую территорию циклонов меньше, чем антициклонов.

Рассмотрение многолетнего хода средних значений продолжительности воздействия циклонов и антициклонов показало, что наиболее продолжительными за весь период исследования над Сибирью были циклоны с северо-западными траекториями движения как по данным приземных синоптических карт, так и по данным реанализа (8,1 и 7,8 сут соответственно), а наименее продолжительными — местные циклоны по данным обоих анализов (2,7 и 2,9 сут соответственно) (табл. 1). Наиболее продолжительны антициклоны с западными (по данным синоптических карт 9,6 сут) и с северо-западными траектори-

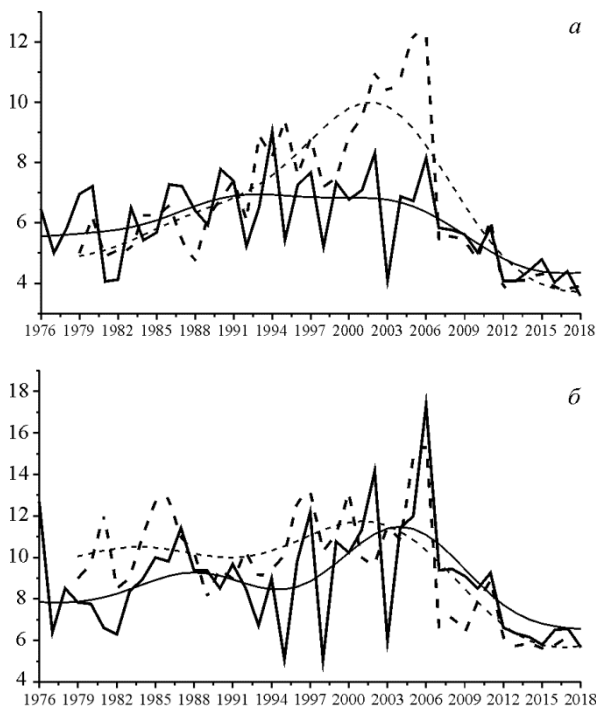


Рис. 3. Продолжительность (сутки) воздействия барических образований (циклонов (а), антициклонов (б)) по данным приземных синоптических карт (сплошная линия) и данным реанализа (прерывистая линия) над Сибирью за период 1976–2018 гг.

ями движения (по данным реанализа 9,2 сут), наименее продолжительны юго-западные (по данным приземных синоптических карт 7,7 сут) и юго-восточные антициклоны (по данным реанализа 6,8 сут).

На рис. 3 показано, что в 2012–2018 гг. как циклоны, так и антициклоны стали менее продолжительными как по данным приземных синоптических карт, так и по данным реанализа. В данную тенденцию наибольший вклад вносят местные циклоны, являясь мелкомасштабными, недолго существующими барическими образованиями, и юго-восточные антициклоны.

По данным приземных синоптических карт и реанализа тренд средней многолетней продолжительности циклонов от-

рицательный незначимый ($-0,03$ и $-0,02$ сут/год соответственно), тренд средней многолетней продолжительности антициклонов по данным приземных синоптических карт отрицательный незначимый ($-0,02$ сут/год), по данным реанализа тренд отрицательный значимый ($-0,10$ сут/год).

Сезонные особенности многолетней изменчивости циклонов и антициклонов и их воспроизведение реанализом

В сезонном ходе количества барических образований максимум отмечался весной, по данным синоптических карт зафиксировано 653 циклона (со средним годовым значением 15,6) и 530 антициклонов (со средним годовым значением 13,9), по данным реанализа 582 циклона (со средним годовым значением 12,6) и 432 антициклона (со средним годовым значением 10,3). Минимум по данным приземных синоптических карт для циклонов отмечался летом — 521 (со средним годовым значением 12,4), а для антициклонов зимой — 397 (со средним годовым значением 10,7), а по данным реанализа как для циклонов, так и для антициклонов минимум отмечался зимой — 450 и 327 барических образований соответственно (со средним годовым значением 9,4 и 7,8 соответственно) (табл. 2).

Во внутригодовом ходе наибольшее среднеемесячное количество циклонов по данным как приземных синоптических карт, так и реанализа отмечалось в мае (230 и 208 соответственно), антициклонов — в апреле (188 и 152 соответственно). Наименьшее среднеемесячное количество антициклонов как по данным приземных синоптических карт, так и по данным реанализа отмечалось в июле (146 и 140 соответственно), а антициклонов — в январе 128 (по данным приземных синоптических карт) и в декабре 104 (по данным реанализа).

Рассмотрение сезонного хода распределения величины давления в центрах барических образований выявило, что по данным приземных синоптических карт наиболее глубокие циклоны

Таблица 2

Многолетние значения числа (n), среднего давления в центре ($P_{\text{ц}}$) и средней продолжительности воздействия (t) циклонов и антициклонов в разные сезоны года над Сибирью по данным синоптических карт и реанализа в 1976–2018 гг.

Сезон	Циклоны					
	Приземные синоптические карты			Реанализ		
	n	$P_{\text{ц}}$	t	n	$P_{\text{ц}}$	t
Зима	559	998,4	7,3	450	992,7	6,9
Весна	653	999,8	5,5	582	997,4	5,8
Лето	521	999,1	6,3	455	996,2	7,2
Осень	582	998,3	7,8	516	995,0	7,1
Сезон	Антициклоны					
	Приземные синоптические карты			Реанализ		
	n	$P_{\text{ц}}$	t	n	$P_{\text{ц}}$	t
Зима	397	1045,0	13,0	327	1034,6	11,0
Весна	530	1031,7	9,0	432	1027,8	9,0
Лето	444	1019,4	9,1	339	1020,1	8,0
Осень	456	1032,1	10,5	374	1028,3	10,2

наблюдаются осенью (998,3 гПа), по данным реанализа — зимой (992,7 гПа), а наименее глубокие циклоны по данным обоих анализов — весной (999,8 и 997,4 гПа соответственно). Наиболее высокие антициклоны — зимой (1045,0 и 1034,6 гПа соответственно), а наименее высокие — летом (1019,4 и 1020,1 гПа соответственно), как по данным синоптических карт, так и по данным реанализа (табл. 2).

Во внутригодовом ходе наиболее глубокие циклоны наблюдаются в октябре (996,3 гПа) по данным приземных синоптических карт и в январе (991,6 гПа) по данным реанализа. Наиболее высокие антициклоны — в феврале (1046,3 гПа) по данным синоптических карт и в декабре (1035,6 гПа) по данным реанализа.

Относительное ослабление циклонов в холодный период года, как и относительное усиление антициклонов в зимний сезон обусловлены господством зимнего Азиатского антициклона над изучаемой территорией [19]. При этом относительное усиление циклонов в весенний сезон обусловлено интенсивным циклогенезом в данный период года, а относительное ослабление антициклонов в летний сезон — уменьшением температурных контрастов [20].

Изучение сезонного распределения продолжительности барических образований выявило, что наименее продолжительны циклоны весной как по данным приземных синоптических карт, так и по данным реанализа (5,5 и 5,8 сут соответственно), наиболее продолжительны осенью (7,8 сут) по данным приземных синоптических карт и летом (7,2 сут) по данным реанализа. Что касается антициклонов, то наиболее продолжительны антициклоны зимой по данным обоих анализов (13,0 и 11,0 сут соответственно), наименее продолжительны весной (9,0 сут) по данным приземных синоптических карт и летом (8,0 сут) по данным реанализа (табл. 2).

Рассмотрение внутригодового хода продолжительности барических образований за весь исследуемый период показало, что по данным приземных синоптических карт наиболее продолжительны циклоны в октябре (9,2 сут), а наименее продолжительны в мае (5,4 сут), по данным реанализа — в июле (7,6 сут) и апреле (5,4 сут) соответственно. По данным приземных синоптических карт наиболее продолжительны антициклоны в январе (14,1 сут), а наименее продолжительны в июне (8,4 сут), по данным реанализа антициклоны наиболее продолжительны в декабре (11,7 сут), а наименее продолжительны в июне–июле (7,8 сут).

Заключение

Проведенный сравнительный анализ многолетней изменчивости характеристик барических образований на территории Сибири по данным приземных синоптических карт и карт, по-

строенных с помощью реанализа, позволяет сделать вывод, что при наличии различий в величине характеристик циклонов и антициклонов реанализ достаточно хорошо отражает качественную картину временной изменчивости барических образований.

В 1976–2018 гг. на территории Сибири количество барических образований увеличилось, давление в центрах циклонов уменьшилось, т.е. они стали более глубокими, а давление в центрах антициклонов выросло, т.е. они стали более высокими, продолжительность воздействия барических образований уменьшилась, как по данным приземных синоптических карт, так и по данным реанализа. Особенно сильно данные тенденции проявились в конце исследуемого периода в 2012–2018 гг., что может говорить о неустойчивости атмосферной циркуляции и, как следствие, нестабильности и аномальности погоды в данные годы в изученном регионе.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках госзадания ИМКЭС СО РАН (рег. № НИОКТР 121031300154-1).

Литература

1. Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология. М. : Изд-во Моск. ун-та, 2006. 582 с.
2. Browning K.A. The sting at the end of the tail: Damaging winds associated with extratropical cyclones // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2004. Vol. 130. P. 375–399. DOI: 10.1256/qj.02.143
3. Zhang X., Lu C., Guan Z. Weakened cyclones, intensified anticyclones and recent extreme cold winter weather events in Eurasia // Environ. Res. Lett. 2012. Vol. 7, No. 4. P. 044044. DOI: 10.1088/1748-9326/7/4/044044
4. Иванова А.С., Латышева И.В., Мордвинов В.И. Особенности зимней циркуляции в районе Азиатского антициклона // Оптика атмосферы и океана. 2004. Т. 17, № 5–6. С. 448–452.
5. Gulev S., Zolina O., Grigoriev S. Extratropical cyclone variability in the Northern Hemisphere winter from the NCEP/NCAR reanalysis data // Climate Dynamics. 2001. Vol. 17. P. 795–809.

6. Ioannidou L., Yau M.K. A climatology of the Northern Hemisphere winter anticyclones // *J. Geophys. Res. Atmospheres*. 2008. Vol. 113, No. D8. P. D081119/1–D081119/17. DOI: 10.1029/2007JD008409
7. Paciorec C.J., Risber J.S., Ventura V., Rosen R.D. Multiple indices of Northern Hemisphere cyclone activity, winters 1949–99 // *J. Climate*. 2002. Vol. 15, No. 13. P. 1573–1590. DOI: 10.1175/1520-0442(2002)015<1573:MIONHC>2.0.CO;2
8. Manning D.M., Hart R.E. Evolution of North Atlantic ERA40 tropical cyclone representation // *Geophys. Res. Lett.* 2007. Vol. 34, No. 5. P. L05705. DOI: 10.1029/2006GL028266
9. Wernly H., Schwierz C. Surface cyclones in the ERA-40 dataset (1958–2001). Part I: Novel identification method and global climatology // *J. Atmos. Sci.* 2006. Vol. 63, No. 10. P. 2486–2507. DOI: 10.1175/JAS3766.1
10. Хан В.М., Стерин А.М., Рубинштейн К.Г. Оценка трендов температуры в свободной атмосфере по данным реанализа и радиозондовым наблюдениям // *Метеорология и гидрология*. 2003. № 3. С. 5–18.
11. Рубинштейн К.Г., Стерин А.М. Сравнение результатов реанализа с аэрологическими данными // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2002. Т. 38, № 3. С. 301–315.
12. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S.K., Hnilo J.J., Fiorino M., Potter G.L. NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2) // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2002. Vol. 83, No. 11. P. 1631–1643. DOI: 10.1175/BAMS-83-11-1631
13. Kobayashi S., Ota Y., Harada Y., Ebata A., Moriya M., Onoda H., Onogi K., Kamahori H., Kobayashi C., Endo H., Miyaoka K., Takahashi K. The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics // *J. Meteorol. Soc. Jpn.* 2015. Vol. 93, No. 1. P. 5–48. DOI: 10.2151/jmsj.2015-001
14. Simmons A., Uppala S., Dee D., Kobayashi S. ERA-Interim: New CMWF reanalysis products from 1989 onwards // *Meteorology Section of ECMWF Newsletter*. 2007. No. 110. P. 25–35.
15. Neu U., Akperov M.G., Bellenbaum N., Benestad R., Blender R., Caballero R., Coccozza A., Dacre H.F., Feng Y., Fraedrich K., Grieger J., Gulev S., Hanley J., Hewson T., Inatsu M., Keay K., Kew S.F., Kindem I., Leckebusch G.S., Liberato M.L.R., Lionello P., Mokhov I.I., Pinto J.G., Raible C.C., Reale M., Rudeva I., Schuster M., Simmonds I., Sinclair M., Sprenger M., Tilinina N.D., Trigo I.F., Ulbrich S., Ulbrich U., Wang X.L., Wernli H. IMILAST: A Community efforts to intercompare extratropical cyclone detection and tracking

- algorithms // Bull. Am. Meteor. Soc. 2013. Vol. 94. P. 529–547. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00154.1
16. Поднебесных Н.В., Ипполитов И.И. Характеристики циклонов и антициклонов над Сибирью в конце XX – начале XXI века // Метеорология и гидрология. 2017. № 4. С. 27–37.
 17. Чемякова Е.Т., Болтовская М.А., Логинов С.В., Пахместерова М.В., Терскова Н.С. Изменчивость вихревой активности на азиатской территории России в конце 20 и начале 21 веков // X Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу: Тезисы Российской конференции 14–17 октября 2013 г. Томск, 2013. С. 157.
 18. Gorbatenko V.P., Ippolotov I.I., Podnebesnykh N.V. Atmospheric circulation over Western Siberia in 1976–2004 // Russ. Meteorol. Hydrol. 2007. Vol. 32, No. 5. P. 301–306.
 19. Бордовская Л.И., Цибульский А.Е. Повторяемость и скорость движения циклонов и антициклонов над Западной Сибирью // Вопросы географии Сибири. 1976. Вып. 9. С. 22–29.
 20. Погосян Х.П. Общая циркуляция атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 396 с.

МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА ИСПАРЕНИЯ С ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

С.А. Иванова¹, А.С. Боронина^{1,2}

¹ *ФГБУ «Государственный гидрологический институт»,
Санкт-Петербург*

² *Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург*

В работе приведены результаты анализа пространственного распределения и межгодовой изменчивости величин испарения с водной поверхности для территории России за период регулярных наблюдений с 1952 по 2024 г. Используются доступные в базе данных ФГБУ «ГТИ» материалы водноиспарительных площадок Росгидромета с рядами данных максимальной продолжительности, а также с наличием наблюдений в последние десятилетия. Отмечены особенности пространственно-временной неоднородности сезонных величин испарения с водной поверхности. В многолетней динамике выделены два периода: до 2000-х гг. — тенденция к уменьшению величины испарения (на фоне роста средней температуры воздуха), а с 2000-х гг. — тенденция к росту испарения по данным наблюдений на многих водноиспарительных площадках России.

Ключевые слова: испарение с водной поверхности, многолетние изменения, климат, водноиспарительная сеть

LONG-TERM DYNAMICS OF THE WATER SURFACE EVAPORATION IN RUSSIA

S.A. Ivanova¹, A.S. Boronina²

¹ *State Hydrological Institute, Saint Petersburg*

² *Saint Petersburg State University, Saint Petersburg*

This study presents an analysis of the water surface evaporation trends in Russia for the period of regular observations from 1952 to 2024. Data from Roshydromet's water evaporation sites with data series of maximum

duration and observations available for recent decades stored in the database of State Hydrologic Institute were used. The peculiarities of spatial and temporal heterogeneity of seasonal water surface evaporation values were detected. Two periods were identified in the long-term dynamics. Until the 2000s, evaporation shows a decreasing trend despite rising average air temperatures. Since the 2000s, the evaporation from the water surface tends to increase according to observations at many water evaporation sites in Russia.

Keywords: water surface evaporation, long-term trends, climate change, water evaporation network

Структура водноиспарительной сети Росгидромета и её временная динамика

Вода — один из важнейших природных ресурсов. Испарение с водной поверхности — не только главный источник поступления водяного пара в атмосферу, основная составляющая водного и теплового баланса, но и значимый элемент водного баланса. Оно учитывается в решении многих прикладных задач, в том числе при планировании и эксплуатации водохранилищ, в оценках водоснабжения населенных пунктов и водообеспечения промышленных предприятий, создании и эксплуатации оросительных систем и в других инженерных и хозяйственных отраслях. Поэтому всестороннее изучение испарения представляет не только научно-теоретический интерес, но и практическую потребность. Однако, несмотря на его значимость, испарение до сих пор является одним из наименее изученных элементов водного режима, что во многом объясняется недостаточностью натурных наблюдений в различных природных условиях, а также различного рода сложностями с получением достоверных данных.

Для изучения и оценки величин испарения с поверхности воды в системе Росгидромета создана сеть водноиспарительных площадок. Основу ее составляют фоновые станции, предназначенные для получения данных о закономерностях рас-

пределения испарения с открытой водной поверхности по территории в точке своего географического размещения. Данные площадки III типа, организованные при существующих метеорологических станциях, оборудованы стандартным наземным испарителем ГГИ-3000.

Станции, оборудованные стандартным испарителем ГГИ-3000 и наземным испарительным бассейном 20 м^2 , относятся к базовым площадкам II типа. Такие станции были предназначены для решения региональных задач — изучения режима испарения в наиболее типичных природно-климатических зонах, получения характеристик испарения для конкретных водных объектов, а также для оценки однородности показаний стандартных сетевых испарителей и организовывались на существующих метеорологических, гидрологических, озерных и воднобалансовых станциях, где кроме метеорологических проводились актинометрические и теплобалансовые наблюдения.

Региональные станции с площадками I типа были предназначены для наблюдений за испарением вблизи конкретных водоемов и на самих водоемах с целью изучения физических основ и основных факторов процесса испарения, а также разработки методов расчета испарения с водной поверхности при отсутствии непосредственных наблюдений. Наряду со стандартным сетевым испарителем ГГИ-3000 и испарительным бассейном 20 м^2 , они оснащались испарительным бассейном 100 м^2 , а также испарителями других размеров и конструкций с соответствующими измерительными средствами и необходимым оборудованием. В состав таких станций, выполняющих функцию исследовательских лабораторий, могли входить несколько площадок II типа, а также плавучая испарительная установка с испарителями, бассейном и метеоплощадкой.

В середине 1980-х гг. водноиспарительная сеть достигла своего максимума — на территории России действовало

320 площадок: 145 на европейской части и 175 на азиатской, функционировал 31 испарительный бассейн 20 м^2 , около 40 плавающих испарительных установок. К 2024 г. водноиспарительная сеть сократилась более чем вдвое: измерения по ГГИ-3000 для всей территории страны проводились на 132 площадках, действовали всего 8 испарительных бассейнов и один плавающий испаритель ГГИ-3000 на болотной станции Брусовица (рис. 1). В большей степени сокращение сети обусловлено износом оборудования и нехваткой наблюдателей [1].

Понимание значимости точности в определении величины испарения можно получить из примера параллельных измерений парой трубка–бюретка и магнитострикционным датчиком уровня за теплый период 2022 г. [2]. Полученная разница величин испарения этими двумя методами составила 5,3 см слоя воды. Для сравнения покажем, с чем сопоставима эта величина в реальных условиях: общая площадь водного зеркала 9 водохранилищ бассейна реки Волги — 20518 км^2 . Сезонное испарение слоя воды в 5,3 см с такой площади дает объем воды, равный примерно $1,09 \text{ км}^3$, что соизмеримо с такими затратами объемов как, к примеру, на орошение или забор на питьевые и хозяйственные нужды в год.

Для повышения точности измерений и уменьшения погрешности за счет человеческого фактора в настоящее время проводится частичное оснащение испарительной сети автоматическими приборами наблюдений, в том числе магнитострикционными датчиками уровня, которые сейчас испытываются на сети. При тщательном соблюдении методики ручных измерений парой трубка–бюретка и измерений с использованием датчика уровня совпадение результатов двумя этими способами достигает 95–97 %. Таким образом, удачное внедрение системы автоматизированных наблюдений позволит значительно увеличить точность измерений и, возможно, расширить наблюдательную сеть.

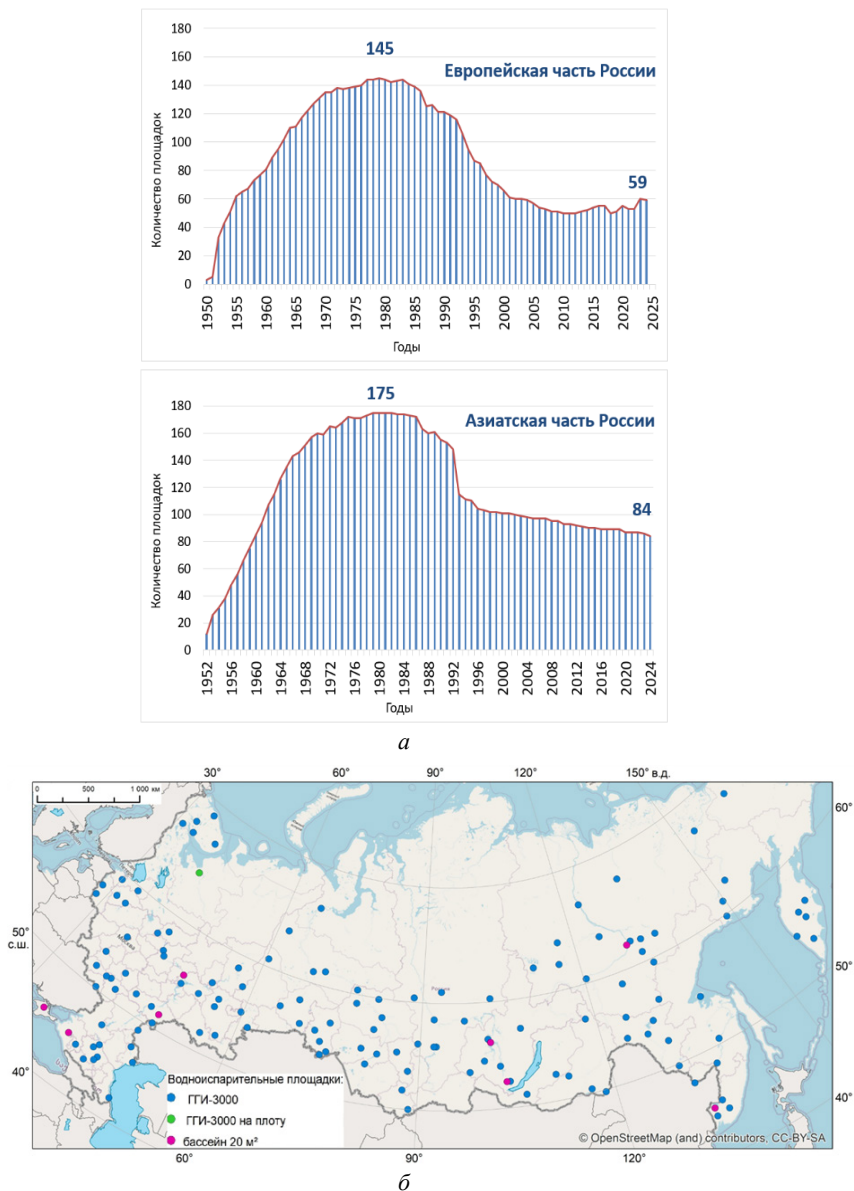


Рис. 1. Количество площадок за годы действия водноиспарительной сети Росгидромета (а) и карта-схема размещения действующих по сведениям от УГМС в 2024 г. водноиспарительных площадок (б)

Пространственная изменчивость испарения

Процесс испарения зависит от целого ряда факторов, ведущие из которых — увлажненность подстилающей поверхности и метеорологические условия над нею (интенсивность солнечной радиации, влажность воздуха и скорость ветра), второстепенные — шероховатость и отражательная способность испаряющей поверхности. Скорость ветра через турбулентное перемешивание вместе с вертикальным градиентом влажности непосредственно влияют на интенсивность испарения, которое пропорционально их величине. При этом рост температуры подстилающей поверхности и скорости ветра увеличивают величину испарения, а рост влажности воздуха уменьшает его величину. Осадки и облачность также оказывают ключевое влияние.

Изучением процесса испарения ученые занимаются до сих пор, стремясь получить наиболее реальные его оценки для всевозможных природных или антропогенных ландшафтных объектов, водных комплексов, находящихся в различных природно-климатических условиях, а также для прогнозирования испарения в будущем.

Детальный анализ и обобщение многолетних до 2010-х гг. изменений испарения с водной поверхности по данным сети водноиспарительных станций европейской территории России (ЕТР) были, в частности, изложены в научно-прикладном справочнике Государственного гидрологического института [3]. В результате анализа выявлена интересная общая закономерность — уменьшение годовых величин сезонного (май–сентябрь) испарения до 1980–1990-х гг. на фоне роста температуры воздуха на ЕТР. Данное явление было отмечено во многих частях Земного шара и получило название «парадокса испарения» [4]. Вместе с этой основной закономерностью изменений сезонного испарения прослеживаются региональные особенности многолетних колебаний, зависящие от местных

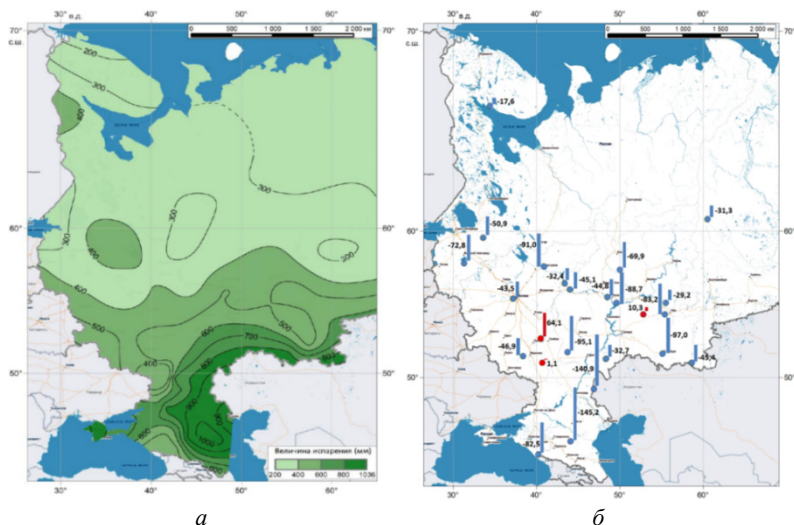


Рис. 2. Карта распределения величин сезонного испарения с водной поверхности по данным испарителя ГТИ-3000 (а); изменения сезонных величин испарения в современный период по сравнению с базовым (в %) по данным наземного испарителя ГТИ-3000 (б). Величина столбца соответствует величине изменения испарения (синие — уменьшение испарения, красные — увеличение) [3]

климатических условий увлажнения, которые играют определяющую роль в формировании режима испарения. Для условий стационарной климатической ситуации (1960–1980 гг.) по данным 71 станции была составлена карта распределения величин сезонного испарения с водной поверхности (рис. 2, а). Основная закономерность пространственного распределения — сезонное испарение возрастает в направлении с северо-запада на юго-восток, от 200 мм на севере Кольского полуострова до 1021 мм на острове Тюлений в Каспийском море.

Анализ временных рядов 24 станций для нестационарной климатической ситуации показал уменьшение сезонного испарения в современный период (1981–2010 гг.) относительно базового (1960–1980 гг.) практически на всей рассматриваемой территории (рис. 2, б). Установлено, что интенсивность этого

снижения растёт с севера на юг — от порядка 0,1 мм в год в зоне тундры до 6,0 мм в год в полупустынной зоне. Оценка линейных трендов в многолетних рядах сезонного испарения для базового периода показала, что на большей части ЕТР наблюдался отрицательный тренд величин сезонного испарения за тёплый период. Абсолютные значения линейного тренда возрастали с северо-запада к юго-востоку. Для современного периода был отмечен в основном положительный тренд сезонного испарения.

Современные тенденции испарения для территории России

Для оценки изменения величин испарения с водной поверхности были использованы материалы регулярных наблюдений на водноиспарительной сети Росгидромета, доступные в базе данных ФГБУ «ГГИ». Были проанализированы данные с 68 площадок, оборудованных стандартным испарителем ГГИ-3000, шести площадок с наземным испарительным бассейном 20 м² и одной площадки с плавучим испарителем. В выборку были включены станции с максимальной длиной и непрерывностью рядов, а также обязательным условием наличия данных наблюдений за последние десятилетия, что дало возможность оценить современные изменения в тенденции испарения.

Величины суммарного за тёплый период испарения в большинстве случаев получены с мая по сентябрь и за редким исключением — с июня по сентябрь, либо по октябрь для пунктов, где наблюдения начинаются позже. В отдельные годы, при начале наблюдательного сезона не с первого дня месяца и при завершении сезона не в последний день месяца, выполнено приведение данных к месячной величине по разработанным в Валдайском филиале ГГИ эмпирическим формулам для восстановления месячных величин испарения при наличии дан-

ных наблюдений за неполный месяц [3]. Затем, для более объективной оценки испарения, данные с наземного испарителя ГГИ-3000, на которые оказывают влияние конструктивные особенности и гидрометеорологические условия над испарителем по сравнению с реальным водоемом, были приведены к испарительному бассейну 20 м^2 по методике, разработанной в [5].

Анализ показал, что характер изменения многолетних величин испарения по европейской территории России (рис. 3, 4) очень разнообразен — наблюдаются как яркие отрицательные или положительные (например, Каневка, Мурманская обл. и

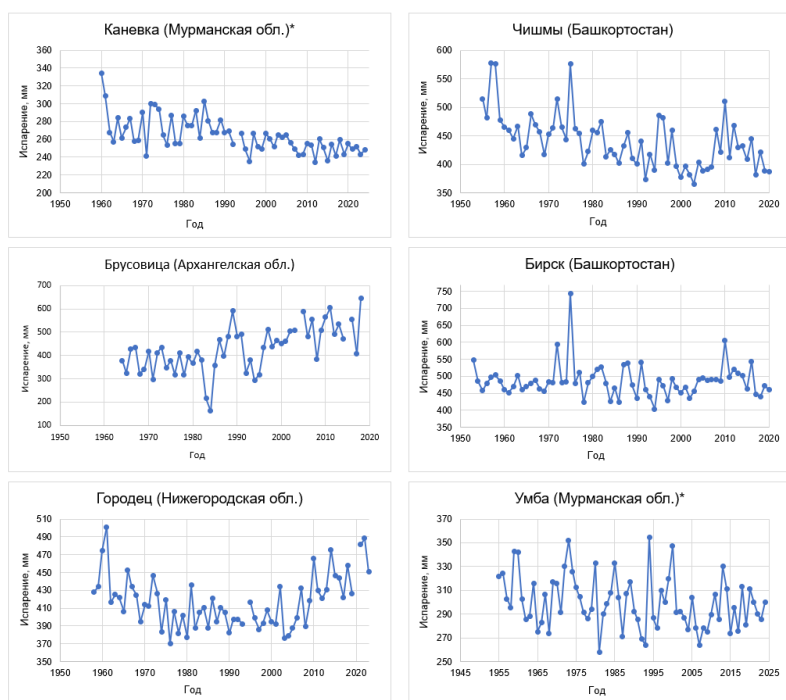


Рис. 3. Примеры многолетних изменений суммарных величин испарения, приведенных к 20 м^2 бассейну, европейская территория России (* сезонные суммы величин испарения приведены за июнь–сентябрь)

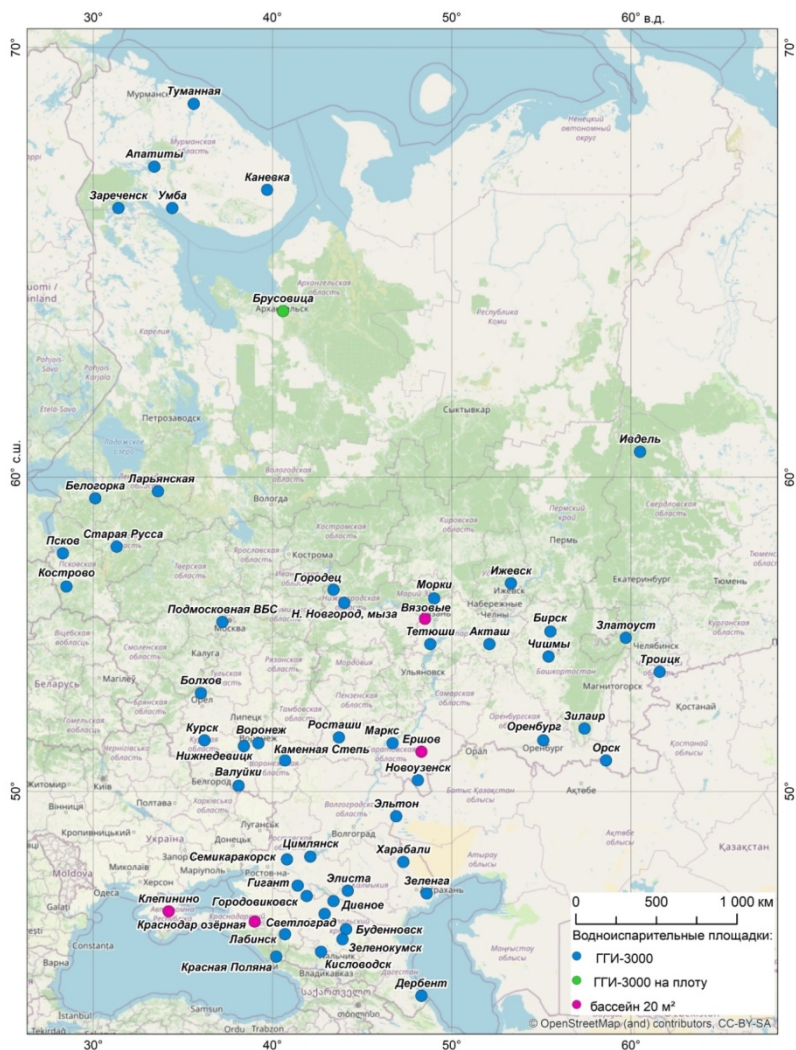


Рис. 4. Водноиспарительные площадки ЕТР, использованные в анализе тенденций испарения в последние десятилетия (синий — ГГИ 3000, зеленый — ГГИ 3000 на плоту, малиновый — 20 м² бассейн)

Брусовица, Архангельская обл.), незначительные, почти отсутствующие (Бирск, Башкортостан) или имеющие ярко-выраженное снижение и затем рост (Городец, Нижегородская обл.),

так и колебания разной степени амплитуды (Умба, Мурманская обл. и Бирск, Башкортостан).

При этом подобные по характеру межгодовых колебаний сезонного испарения площадки могут находиться далеко друг от друга, в различных климатических или природных зонах

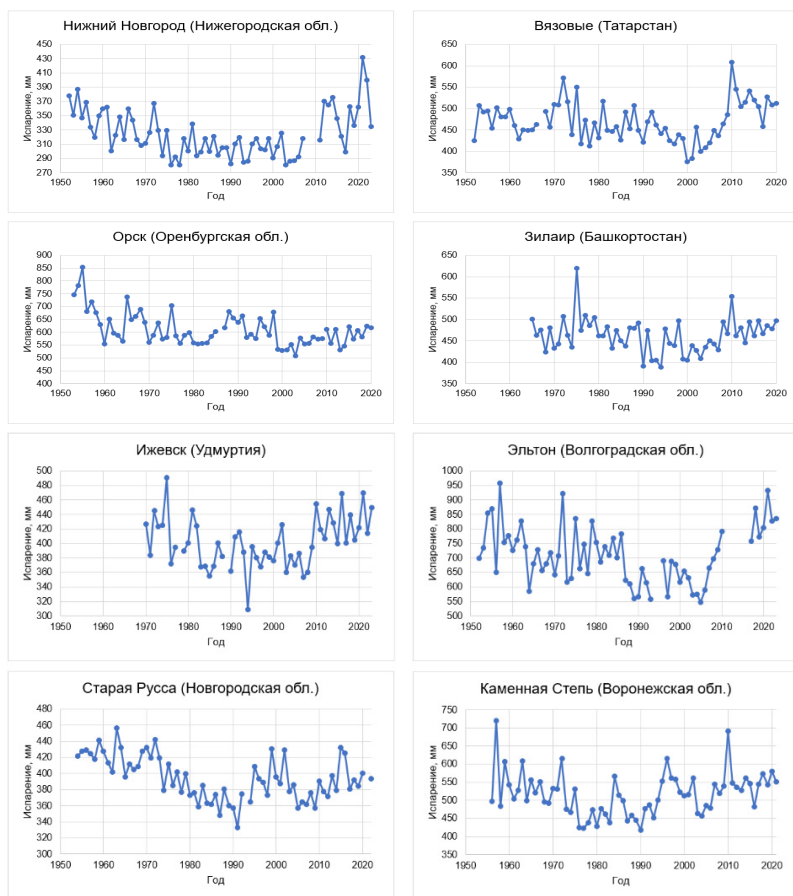


Рис. 5. Примеры многолетних изменений суммарных величин испарения, приведенных к 20 м² бассейну, с тенденциями роста испарения последние десятилетия

(например, Каневка, Мурманская область и Чишмы, Башкортостан). И наоборот, на близкорасположенных площадках можно видеть отличия в межгодовой амплитуде или тенденции хода испарения (например, Бирск и Чишмы в Башкортостане, Каневка и Умба в Мурманской обл.). Причиной такой пестроты могут быть как региональные природно-климатические условия расположения станций, так и другие факторы (как вариант — изменения в методике измерений или несоблюдение наставлений по наблюдениям), требующие локальных исследований.

Тем не менее на многих водноиспарительных площадках выявлена тенденция увеличения испарения в последние годы. Это особенно хорошо прослеживается в районах бассейнов рек Волги и Дона и на соседних к ним территориях, где наблюдается четкий рост испарения, начиная с 2000-х гг. (рис. 5). Аналогичная тенденция к росту испарения в последнее десятилетие также стала проявляться и на ряде северных и восточных пунктов наблюдений.

Анализ многолетней величины испарения с водной поверхности азиатской части России (АТР) показывает аналогичную неопределенность в характере его многолетних изменений. Тем не менее на 16-ти из 27-ми исследуемых площадок отмечается заметный рост испарения в последние годы. Однако здесь еще более ярко, чем на европейской территории страны, видны противоположные тенденции на близкорасположенных станциях (рис. 6).

Это можно видеть, к примеру, по данным измерений водноиспарительных бассейнов Братска и Ангарска. И если сравнить рядом расположенные Хомутово и Ангарск, последний показывает явное уменьшение испарения в последние десятилетия, а Хомутово, наоборот, рост (рис. 7, 8).



Рис. 6. Тенденции многолетнего хода испарения последних десятилетий



Рис. 7. Водноиспарительные площадки АТР, использованные в анализе тенденций испарения в последние десятилетия
(1 — пункты наблюдений, 2 — границы УГМС)

Выводы

В результате анализа многолетних данных наблюдений на водноиспарительной сети Росгидромета выявлена значительная неоднородность в тенденции хода испарения в последние годы. Часть ее объясняется, по всей видимости, локальными особенностями условий, определяющих величину

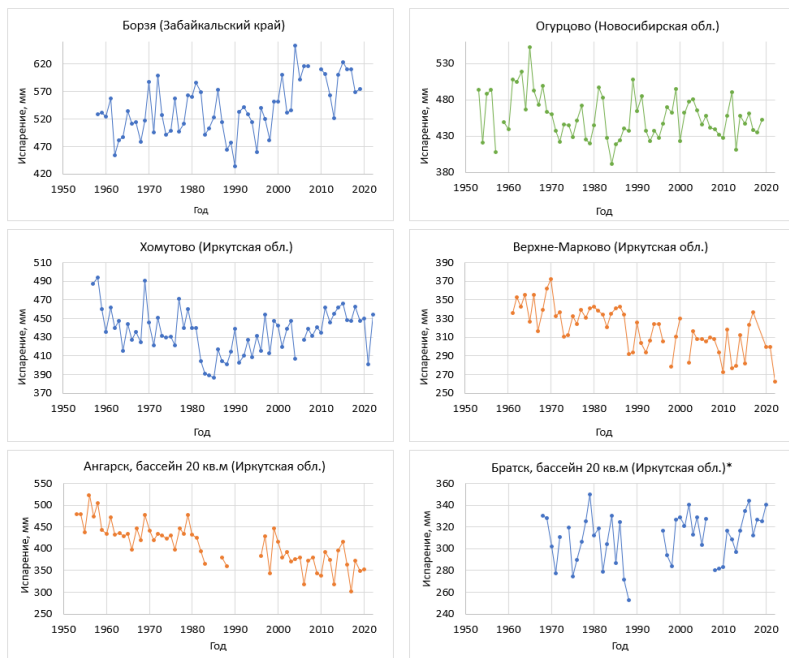


Рис. 8. Примеры многолетних изменений суммарных величин испарения, приведенных к 20 м² бассейну, азиатская территория России (* сезонные суммы величин испарения для Братска здесь приведены за июнь–октябрь)

сезонного испарения с водной поверхности, а часть может быть связана в том числе и с недостаточной достоверностью данных (низкая квалификация наблюдателей, отклонения в методике наблюдений при замене измерительных приборов, а также случайная неопределяемая погрешность из-за влияния человеческого фактора).

Несмотря на неоднородность пространственно-временного распределения тенденций испарения, можно выделить два периода для территории России:

— до 2000-х гг. прослеживается аномальная (учитывая рост средней температуры воздуха) тенденция к уменьшению величины испарения, отмеченная также во многих регионах ми-

ра и находящаяся на стадии изучения мировым ученым сообществом (так называемый «парадокс испарения»);

– с 2000-х гг. по данным наблюдений на многих водноиспарительных площадках России наблюдается тенденция к росту испарения с водной поверхности.

Результаты исследований показывают, что испарение остается до сих пор трудно поддающимся оценке и прогнозированию элементом водного режима. Необходимо дальнейшее совершенствование его наблюдений в различных природных условиях при тщательном соблюдении ручной методики и с постепенным переходом на автоматизацию. Это позволит снизить погрешности и увеличить число пунктов наблюдений в районах, где нет специалистов с соответствующей квалификацией.

Литература

1. Обзор состояния системы гидрологических наблюдений, обработки данных и подготовки информационной продукции в 2023 г. : Справочное издание / ФБГУ «ГТИ». СПб. : ООО «РИАЛ», 2023. 66 с.
2. Развитие и модернизация технологий мониторинга водных объектов суши по гидрологическим показателям, включая технологии их метеорологического обеспечения и технологий выпуска аналитических обобщений по поверхностным водам суши. Разработка научно-методических основ для совершенствования функционирования гидрологической сети : Отчет о НИР (промежут.) / ФГБУ «ГТИ»; Книга 1. Шифр темы 2.2 раздел 2.2.1 подраздел 2.2.1.1. Рег. № НИОКТР: АААА-А20-120112690064-2. Рег. № ИКРБС: АААА-Б20-22012249 0175-5. СПб., 2022. 160 с.
3. Многолетние изменения испарения на Европейской территории России по данным водноиспарительной сети : Научно-прикладной справочник. СПб. : ООО «РИАЛ», 2021. 64 с.
4. 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, 2007. 996 p.
5. Голубев В.С., Урываев А.П. Метод водных испарителей и его применение для расчета испарения с поверхности водоемов // Труды ГТИ. 1983. Вып. 289. С. 69–76.

**ОПЕРАТИВНОЕ АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ
ТЕХНОЛОГИЯХ «ИНФОРМАЦИОННО-
ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА»
И «АРМ-АГРОПРОГНОЗ»**

В.М. Лебедева, Т.А. Найдина, Д.А. Калашников,
Я.Ю. Знаменская

*ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт
сельскохозяйственной метеорологии» (ФГБУ «ВНИИСХМ»),
Обнинск*

Статья посвящена проблеме оперативного агрометеорологического прогнозирования в рамках автоматизированных технологий «Информационно-прогностическая система» (ИПС) и «АРМ-Агропрогноз». Технологии предусматривают накопление данных, включая суточные и декадные метеорологические данные, статистические данные РОССТАТа, а также спутниковые вегетационные индексы NDVI, обрабатываемых в системе управления базами данных Firebird.

Особое внимание уделено контролю качества данных, поступающих в оперативном режиме в коде КН-21, от которых, в значительной степени, зависит точность полученных прогнозов урожайности и валового сбора сельскохозяйственных культур, влаго- и теплообеспеченности вегетационного периода. Подсистема прогнозирования ИПС и «АРМ-Агропрогноз» при необходимости может быть дополнена другими методами агрометеорологических прогнозов.

Ключевые слова: автоматизированная система, формирование базы данных, агрометеорологический прогноз, динамико-статистическая модель «погода – урожай», прогноз урожайности

**OPERATIONAL AGROMETEOROLOGICAL
FORECASTING WITH AUTOMATED TECHNOLOGIES:
“INFORMATION AND PROGNOSTIC SYSTEM”
AND “ARM-AGROPROGNOZ”**

V.M. Lebedeva, T.A. Naidina, D.A. Kalashnikov,
Ya.Yu. Znamenskaya

*All-Russian Research Institute of Agricultural Meteorology
(VNIISKhM), Obninsk*

The article addresses the issue of operational agrometeorological forecasting within the framework of automated technologies, namely the — “Information and Prognostic System (IPS)” and “ARM-Agroprognoz”. The technologies involve the accumulation of data processed in the Firebird database management system, including daily and ten-day meteorological data, statistical data from Rosstat, as well as satellite normalized difference vegetation indices.

Special attention is paid to the quality control of data received in real-time in code KN-21, which significantly affects the accuracy of yield and total crop production forecasts, as well as moisture and thermal conditions during the vegetation period. The forecasting subsystem of the IPS and “ARM-Agroprognoz” can be supplemented with other agrometeorological forecasting methods if necessary.

Keywords: automated system, database formation, agrometeorological forecast, dynamic-statistical model “weather-yield”, crop yield forecast

В системе обеспечения потребителей оперативной гидрометеорологической информацией важное место занимают агрометеорологические прогнозы. Используемые в оперативной работе методы прогнозов проходят производственные испытания и утверждаются ЦМКП Росгидромета. Рассматриваемые технологии позволяют автоматизировать расчет прогностических значений для субъектов земледельческой зоны РФ в Информационно-прогностической системе и для отдельных

субъектов — в УГМС и ЦГМС Росгидромета. Технологии предусматривают накопление данных, включая суточные и декадные метеорологические данные, статистические данные РОССТАТа, а также спутниковые вегетационные индексы NDVI, обрабатываемых в системе управления базами данных Firebird.

Оперативное агрометеорологическое прогнозирование в информационно-прогностической системе (ИПС) [1], установленной в ФГБУ «ВНИИСХМ» и ФГБУ «Гидрометцентр России», а также в технологии «АРМ-Агропрогноз», созданной в 2020–2024 гг. для 19-ти УГМС Росгидромета [2], включает методы агрометеорологических прогнозов, основанные на динамических моделях продуктивности растений и регрессионных уравнениях. Прогнозы урожайности основных сельскохозяйственных культур на основе динамико-статистической модели в автоматизированной технологии ИПС составляются по субъектам всей земледельческой зоны Российской Федерации, а в региональных системах «АРМ-Агропрогноз» — по субъектам зоны ответственности каждого УГМС. Ряд агрометеорологических прогнозов был разработан как для отдельных субъектов, так и для всей земледельческой зоны РФ на основе регрессионного анализа.

Разработанные во ВНИИСХМ автоматизированные технологии позволяют раскодировать и накапливать оперативную метеорологическую и агрометеорологическую информацию, поступающую с гидрометеорологических станций в коде КН-21 [3]. Систематический сбор и хранение декадной и суточной информации из телеграмм позволили создать в указанных технологиях подсистемы оперативного прогнозирования, существенно сокращающие время, затрачиваемое на составление прогнозов.

Входной информацией для составления оперативных прогнозов, кроме метеорологической и агрометеорологической информации по земледельческой зоне в коде КН-21, являются статистические данные РОССТАТа и дополнительная инфор-

мация: данные со спутников (вегетационные индексы NDVI) и отсутствующая в телеграммах метеорологическая и агрометеорологическая информация (даты формирования и схода снежного покрова и др.), которая заносится в базу данных с помощью меню «Дополнительный ввод».

Для успешного агрометеорологического прогнозирования необходима своевременно поступающая достоверная информация, поэтому в оперативных подразделениях большое внимание уделяется проверке получаемой информации. Усвоение входной информации проходит несколько этапов: ввод, контроль входных данных и последующий анализ метеорологических и агрометеорологических элементов.

База данных технологий ИПС и «АРМ-Агропрогноз» работает под управлением Firebird (Firebird SQL), созданной как ответвление Interbase. Firebird — система управления базами данных с открытым кодом, кроссплатформенная система, которая работает на macOS, Linux, Microsoft Windows, некоторых Unix-платформах. Реляционная база данных «АРМ-Агропрогноз» имеет чёткую логическую структуру, данные структурированы в соответствии с разделами кода КН-21, первичные ключи для выборки данных чётко определены, что облегчает поиск и извлечение необходимой информации для формирования входного массива данных. Она поддерживает хранимые процедуры на языке PSQL, триггеры, транзакционно-независимые 64-битные генераторы последовательностей. У Firebird есть несколько уровней изолированности транзакций, что обеспечивает резервное копирование без остановки сервера. Реализована поддержка Юникода. Базы данных могут быть расположены в нескольких файлах, предельный размер которых зависит от операционной системы, теоретический предел — 64 ТБ для одного файла базы данных.

В установленные оперативные сроки агрометеорологическая информация в коде КН-21 поступает в подразделения Росгидромета. На первом этапе подсистема декодирования оперативной агрометеорологической информации осуществляет

контроль входных данных посредством синтаксического разбора кодовых форм и логического анализа значений метеорологических и агрометеорологических параметров только по одной станции [4, 5]. При раскодировании в файле телеграмм с диагностикой ошибок появляются комментарии, на которые следует обратить внимание. Например, величина запасов влаги в метровом, полуметровом слоях почвы, а также на глубине 20, 10 и 5 см должна уменьшаться по убыванию глубины, т.е. величина запасов влаги на глубине 20 см не должна превышать величину запасов влаги полуметрового слоя. Если это условие не выполняется, в файле с диагностикой ошибок появляется соответствующий комментарий (рис. 1). Ошибку можно исправить, если очевидна правильная запись, или удалить группу из телеграммы, если внесение правок не представляется возможным.

Далее создаётся промежуточная база данных, в которой вся информация разделена по зонам (аналогично зонам в коде

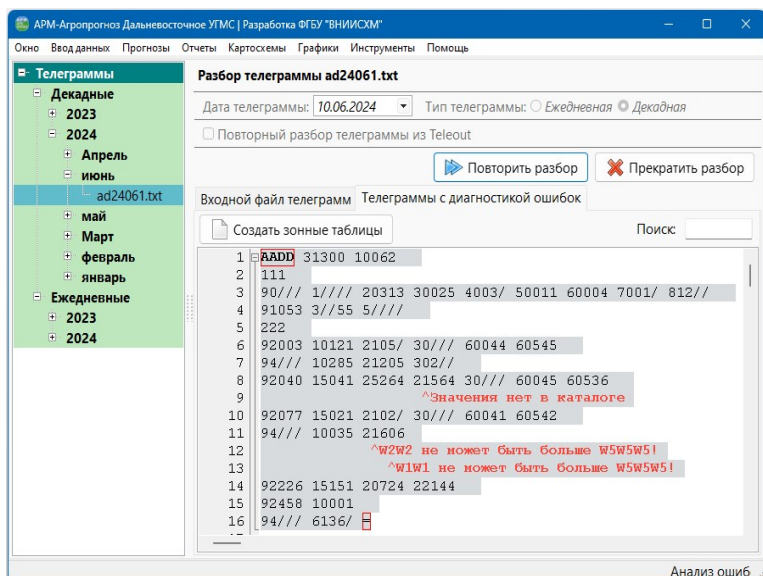


Рис. 1. Первый этап обработки информации — логический контроль

Республика Коми (2)

ЛПН	Метеостанция	ДДММ	ToTo	TfTx	ntx	ToTu	ntu	RRR	nR1	RoRoRoRo	RxRxRx	nR5	fxfx	nf	nr
22 876 Крестовск	31/12	9	-2,3	2	-8	-9		16,0	6	136	5,0		14		
56 203 Мохитский	31/12	9	-2,3	1	-7	-8		13,0	5	69	5,0	1			
22 641 Овста	31/12	8	-1,4	3	-11	-20	1	34,0	6	211	11,0	3	23	2	
22 563 Шига	31/12	9	-2,9	2	-11	-9		25,0	6	178	9,0	2	15	1	
22 676 Сура	31/12	10	-3,2	-	-13	-18		15,0	4	108	5,0	1	18	2	
22 648 Тарасово	31/12	9	-1,8	2	-12	-19		12,0	4	100	3,0		18	3	
22 559 Хольское	31/12	9	-2,6	2	-12	-23	1	25,0	5	180	7,0	3	19	1	
22 869 Шига	31/12	8	-2,7	1	-8	-9		23,0	6	135	6,0	1	15	2	
22 768 Шеняурск	31/12	9	-2,1	2	-7	-10		12,0	3	86	4,0				
22 798 Яренск	31/12	10	-3,2	0	-11	-19		24,0	6	142	7,0	2	13		

Таблица AD90

ЛПН	Метеостанция	ДДММ	ToTo	TfTx	ntx	ToTu	ntu	RRR	nR1	RoRoRoRo	RxRxRx	nR5	fxfx	nf	nr
22 686 Вендига	31/12	11	-3,4	1	-11	-17		13,0	6	103	3,0		14		
23 503 Ижа	31/12	12	-4,2	0	-15	-24	1	34,0	6	225	7,0	2	15	1	
23 509 Кель-Вол	31/12	12	-3,6	-1	-16	15	10	16,0	4		5,0		14		
23 904 Койгородок	31/12	9	-3,6	1	-10	-14		20,0	6	123	7,0	2	14		
23 708 Луя	31/12	11	-3,7	0	-16	-16		19,0	6	136	7,0	1	18	1	
23 998 Обанько	31/12	9	-3,4	0	-9	-14		24,0	5	147	8,0	2	14		
23 709 Помоздино	31/12	11	-3,9	0	-18	-19		21,0	7	149	5,0	1	14		
23 807 Пустов	31/12	10	-3,3	0	-10	-16		17,0	5	131	5,0	1	15	2	
23 804 Сыктывкар АМЦ	31/12	10	-3,1	0	-11	-15		2,0	7	156	8,0	2	11		
23 711 Троице-Печорское А	31/12	8	-0,8	0	-22	-23	1	16,0	7	109	3,0		12		
23 707 Усть-Вьюк	31/12	-10	-3,2	0	-12	-15		17,0	5		7,0	1	15	1	

F:\IPS\WV\reports\bb\AD90.RPT

Рис. 2. Второй этап обработки информации — экспертный анализ списков оперативных данных

КН-21) и по субъектам РФ. На втором этапе контроля данных осуществляется экспертный анализ сформированных списков оперативных данных. Нами была проведена частичная автоматизация экспертного анализа средствами CrystalReports: реализована маркировка очевидных ошибок, выделены сомнительные данные, явные и неявные ошибки через расчёт медианы, разброса, отклонений параметров от среднего значения — для упрощения работы пользователя и повышения качества анализа входных данных. Пользователь анализирует информацию в зонных таблицах, обращая внимание на выделенные цветом и шрифтом значения (рис. 2). После исправления ошибок в зонных таблицах информация заносится в основную базу данных.

В ИПС реализован и функционирует автоматизированный ввод данных о посевных площадях, урожайностях, валовом сборе из Excel-файлов (информация РОССТАТ) и спутниковых данных (декадных индексов NDVI пахотных земель), полученных с сервиса ВЕГА-PRO (<http://pro-vega.ru>) Института космических исследований Российской академии наук.

В системах «АРМ-Агропрогноз» эта информация заносится вручную посредством меню: Ввод данных – Дополнительные данные.

В настоящее время в ИПС и во всех региональных системах «АРМ-Агропрогноз» в подсистему прогнозирования включены разработанные в ФГБУ «ВНИИСХМ» **динамико-статистические методы прогноза урожайности и валового сбора** основных сельскохозяйственных культур: яровой и озимой пшеницы, озимой ржи, ярового ячменя, картофеля, кукурузы, гречихи, зерновых и зернобобовых культур в целом [1, 6–9].

Динамико-статистические методы прогноза урожайности основаны на динамической модели продукционного процесса растений и статистических методах. С помощью статистических методов по временному ряду фактических значений осуществляется расчёт тенденции урожайности сельскохозяйственных культур на прогнозируемый год. Динамико-статистический метод позволяет выполнить сразу две задачи:

- прогноз урожайности в установленные Росгидрометом сроки;
- ежелектная оценка состояния посевов от всходов до восковой спелости в процентах от среднего многолетнего уровня.

На рис. 3 показан пример расчёта прогноза урожайности кукурузы с использованием спутниковых данных NDVI, полученных с сервиса Вега ИКИ РАН (<http://pro-vega.ru>) в системе «АРМ-Агропрогноз» для Северо-Кавказского УГМС.

В системах «АРМ-Агропрогноз», установленных в 19-ти УГМС и их филиалах, в подсистеме прогнозирования включён метод **прогноза запасов влаги к началу вегетационного периода** Л.А. Разумовой [10], основанный на регрессионной модели. Прогноз составляется после получения декадных данных за вторую декаду февраля. Для расчёта ожидаемых запасов продуктивной влаги используются следующие данные: запасы продуктивной влаги в почве в слое 0–100 см осенью (последнее определение перед замерзанием почвы), сумма осадков с последнего определения влажности почвы осенью по вторую

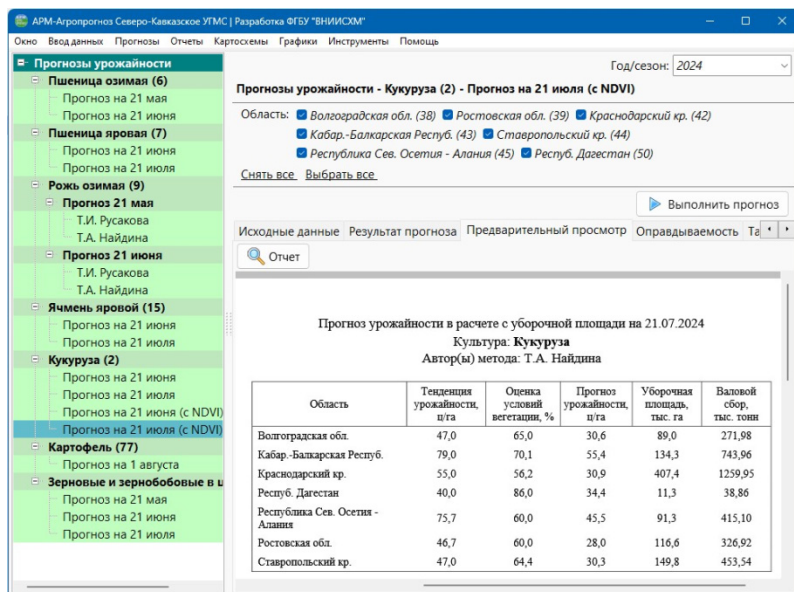


Рис. 3. Пример расчёта прогноза урожайности кукурузы в Северо-Кавказском УГМС

декаду февраля текущего года, средние многолетние значения суммы осадков за период с третьей декады февраля до перехода температуры воздуха через 5°C и наименьшая полевая влагемкость. Пример расчёта запасов продуктивной влаги в почве к началу вегетационного периода для Амурской области приведён на рис. 4.

В ряде УГМС дополнительно в подсистему прогнозирования «АРМ-Агропрогноз» включены другие методы агрометеорологических прогнозов, в основе которых также лежит регрессионная модель.

Прогноз влагообеспеченности сельскохозяйственных культур по методу А.М. Алпатьева [11] включён в технологию «АРМ-Агропрогноз» для Иркутского УГМС. Метод предполагает использование метеорологических данных для расчёта разности между рассчитанной испаряемостью и реальным испарением (рис. 5). Для расчёта прогноза используются суточные

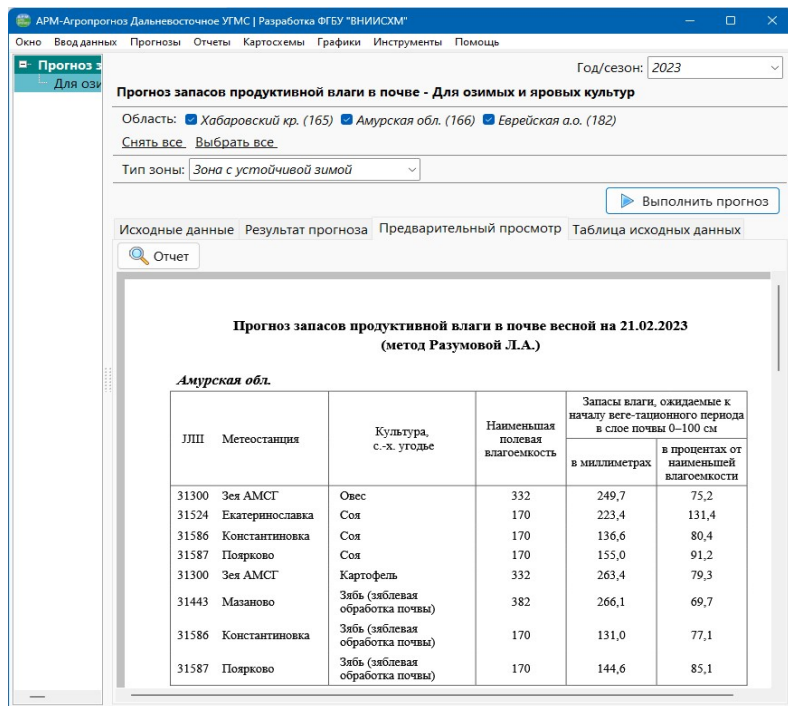


Рис. 4. Прогноз запасов продуктивной влаги в почве к началу вегетационного периода

метеорологические и декадные агрометеорологические данные: ежедневная температура воздуха для определения дат перехода температуры воздуха через 5°C , среднесуточный дефицит насыщения влажности воздуха, количество осадков за сутки, дата сева, запасы влаги в почве. Рассчитывается суммарный дефицит влажности воздуха, количество осадков с даты сева до восковой спелости фазы «Б» и в итоге — суммарное испарение растительного покрова фитоценоза. Пример расчёта влагообеспеченности сельскохозяйственных культур по методу А.М. Алпатыева в Иркутской области приведён на рис. 5.

Прогноз теплообеспеченности вегетационного периода согласно методике Л.П. Саваринюк по станциям Свердлов-

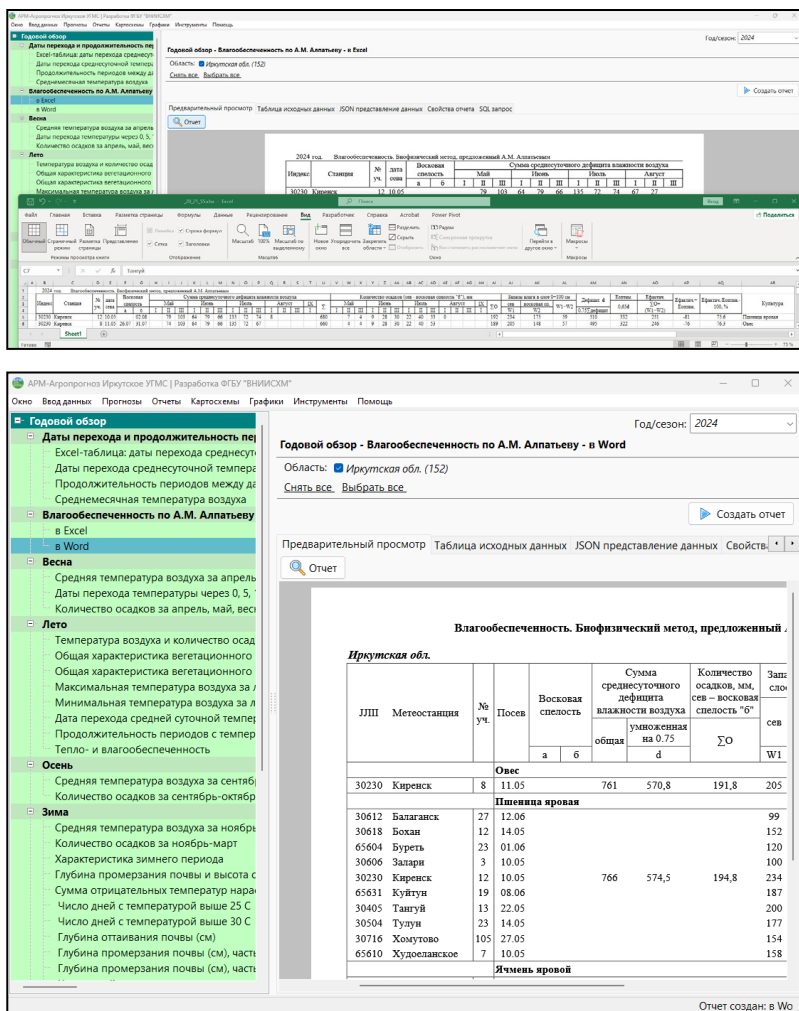


Рис. 5. Пример прогнозирования влагообеспеченности по методу А.М. Алпатьева

кой области (Уральское УГМС) составляется после устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через 0°C [12]. Рассчитываются ожидаемые даты перехода температуры через 10°C , прогноз сумм температуры воздуха выше 10°C

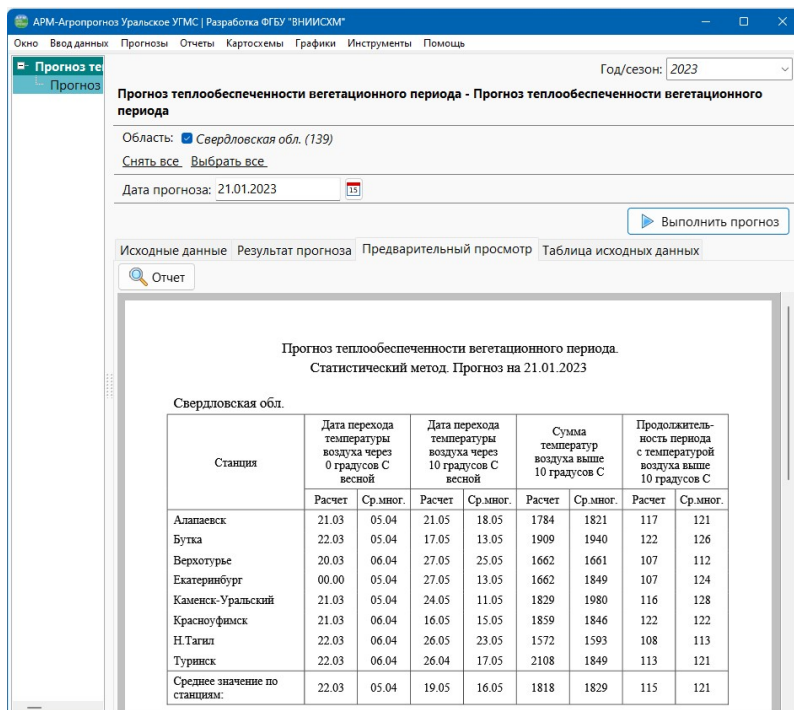


Рис. 6. Прогноз теплообеспеченности вегетационного периода

за вегетационный период, а также продолжительность периода с температурой воздуха более 10°C . Каждая из этих величин рассчитывается по уравнениям, уникальным для каждой станции Свердловской области (рис. 6).

В системе «АРМ-Агропрогноз» для Крымского УГМС в подсистему прогнозирования включены **методы прогноза урожайности озимой и яровой пшеницы, ярового ячменя по методикам Е.С. Улановой** [13], в основе которых лежит регрессионный анализ. Для этого прогноза используют следующие входные данные: запасы продуктивной влаги в слое почвы 0–100 см на фазу выхода в трубку (в мм) и густота стояния растений (т.е. число продуктивных стеблей) в период кошения. Подсистема прогнозирования ИПС и «АРМ-Агропрогноз» в дальнейшем, при наличии финансирования, может

быть дополнена другими методами агрометеорологических прогнозов, успешно прошедших производственные испытания. Новые методы могут быть включены в автоматизированные технологии посредством создания отдельных программ, хранимых процедур, sql-запросов к базе данных с использованием различных инструментов для считывания пользователем данных из базы и дальнейшего расчёта агрометеорологических прогнозов.

Литература

1. Лебедева В.М., Страшная А.И. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Том II: Методы расчётов и прогнозов в агрометеорологии. Книга 2: Оперативное агрометеорологическое прогнозирование: Учебное пособие. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. 216 с.
2. Лебедева В.М., Калашиников Д.А., Найдина Т.А., Шкляева Н.М., Знаменская Я.Ю. Автоматизированная система «АРМ-Агропрогноз» для агрометеорологического обеспечения АПК, адаптированная для Центрального УГМС // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 3 (377). С. 92–102.
3. РД 52.27.707-2008. Код для составления декадных и ежедневных агрометеорологических телеграмм КН-21. М., 2008.
4. Лебедева В.М., Калашиников Д.А., Найдина Т.А., Шкляева Н.М., Знаменская Я.Ю. Автоматизированная технология раскодирования и использования оперативной агрометеорологической информации в региональных оперативных подразделениях Росгидромета // Фундаментальные и прикладные исследования в гидрометеорологии: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию каф. общего земледения и гидрометеорологии Белорус. гос. ун-та, Минск, 11–13 окт. 2023 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: П.С. Лопух (гл. ред.), Ю.А. Гледко, Е.В. Логинова. Минск: БГУ, 2023. С. 512–520.
5. Найдина Т.А., Лебедева В.М. Раскодирование агрометеорологической информации по районам пастбищного животноводства // Труды СибНИГМИ «Проблемы гидрометеорологических прогнозов, экологии, климата». 2021. Вып. 107. С. 112–121.

6. *Полевой А.Н., Русакова Т.И. и др.* Прикладная динамическая модель формирования урожая сельскохозяйственных культур // Гидрометеорологическое обеспечение агропромышленного комплекса страны. Л. : Гидрометеиздат, 1991. С. 15–31.
7. *Гончарова Т.А., Найдина Т.А., Лебедева В.М., Береза О.В.* Оценка условий вегетации и прогноза урожайности кукурузы с использованием спутниковой и наземной информации по субъектам Российской Федерации и результаты его испытания // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2 (368). С. 144–153.
8. *Kleshchenko A.D., Naidina T.A., Goncharova T.A., Lebedeva V.M.* Evaluation of growth conditions and maize yield forecast in Russian regions from satellite data in a simulation model // Italian Journal of Agrometeorology. 2016. Vol. 21, No. 1. P. 59–66.
9. *Гончарова Т.А., Найдина Т.А.* Результаты испытания метода прогноза урожайности яровой пшеницы в Уральском, Обь-Иртышском, Западно-Сибирском, Среднесибирском, Иркутском, Забайкальском, Приморском, Дальневосточном УГМС // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2014. № 41. С. 127–135.
10. Руководство по агрометеорологическим прогнозам. Л. : Гидрометеиздат, 1984. Т. 1. 309 с.
11. *Алпатыев С.М.* К вопросу о расчётной обеспеченности дефицита водного баланса при проектировании орошения // Водное хозяйство. 1965. Вып. 2. С. 5–17.
12. Решение техсовета ФГБУ «Уральское УГМС» от 12.12.1990 г.
13. *Уланова Е.С.* Методы агрометеорологических прогнозов. Л. : Гидрометеиздат, 1959.

КРАТКОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАСХОДОВ ВОДЫ С РАЗЛИЧНОЙ ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТЬЮ НА КРУПНЫХ РЕКАХ (НА ПРИМЕРЕ БАССЕЙНА РЕКИ ИРТЫШ)

Е.В. Гайдукова, К.Ю. Салаурова, И.О. Винокуров

*Российский государственный гидрометеорологический университет
(РГГМУ), Санкт-Петербург*

Рассмотрено прогнозирование расходов воды с различной заблаговременностью на крупных реках, производится выбор оптимальной заблаговременности для краткосрочного прогноза расходов воды весеннего половодья, оценена точность и эффективность методик. Кроме этого, выявлены проблемные моменты при оценке эффективности прогностических методик стандартными подходами. Были рассмотрены зарубежные критерии оценки точности прогноза и произведено сравнение их результатов.

Ключевые слова: метод тенденции, критерии оценки эффективности, оптимальная заблаговременность, прогнозы

SHORT-TERM FORECASTING OF WATER DISCHARGE WITH DIFFERENT LEAD TIMES ON LARGE RIVERS (USING THE IRTYSH RIVER BASIN AS AN EXAMPLE)

E.V. Gaidukova, K.Yu. Salaurova, I.O. Vinokurov

Russian State Hydrometeorological University (RSHU), Saint-Petersburg

The article considers forecasting of water discharge with different lead times on large rivers, selects the optimal lead time for short-term forecast of spring flood water discharge, and evaluates the accuracy and efficiency of the methods. In addition, problematic issues in assessing the effectiveness of forecasting methods using standard approaches were identified. Foreign criteria for assessing the accuracy of the forecast were considered and their results were compared.

Keywords: trend method, criteria for assessing the effectiveness, optimal lead time, forecasts

Введение

Краткосрочное прогнозирование элементов гидрологического режима представляет собой важную часть в гидрологии. Прогноз с достаточной заблаговременностью может предупредить различного рода опасные ситуации, например затопление населенных пунктов в период прохождения весеннего половодья [1].

Существует множество подходов прогноза гидрологических величин, выбор методики прогнозирования должен осуществляться с учетом не только заблаговременности и точности выпускаемых с ее помощью прогнозов, но и с учетом трудоемкости их получения. Кроме того, целесообразно учитывать возможность использования этой методики в рамках автоматизированной системы подготовки и выпуска прогнозов и своевременного доведения прогностической информации до всех заинтересованных потребителей в удобном для них виде. Таким образом, при прочих равных условиях предпочтение следует отдавать более простым методикам прогнозирования [2].

Помимо самого прогноза необходимо выполнять соответствующую проверку на качество полученного прогноза. В настоящее время в большинстве стран мира, а в последние годы и в России, наряду с общепринятыми подходами ГМЦ и ГГИ, используется опубликованный в 1970 г. показатель Нэша–Сатклиффа. В источнике [2] отмечено, что данный показатель вполне подходит для оценки качества модели, однако не совсем подходит для оценки эффективности применения использующей данную модель методики прогнозирования. В отечественной практике вывод о применимости методики прогнозирования делается на основе сравнения ее погрешности с погрешностью альтернативного прогноза, который учитывает только известные к дате его составления данные гидрологических наблюдений. Такой подход представляется более обоснованным и может приводить к выводам, не совпадающим с выводами об эффективности используемой модели.

Цель данного исследования заключается в выявлении оптимальной заблаговременности для краткосрочного прогноза расходов воды весеннего половодья на крупных реках и в оценке точности и эффективности методик на примере реки Иртыш. Был проведен анализ существующих методов краткосрочного прогнозирования на крупных реках; дана характеристика района исследования реки Иртыш и определены водотоки, для которых актуальна задача прогнозирования стока [1, 3]; выполнен прогноз по наиболее практичному методу для крупных рек; оценена точность и эффективность полученных прогнозов; дан анализ полученных результатов исследования и определена оптимальная заблаговременность для краткосрочного прогнозирования расходов воды на крупных реках.

В результате работы была выявлена проблема в критериях оценки эффективности прогноза. Оценка эффективности прогнозной методики методом ГМЦ [4] показала занижение критерия. Графики прогнозных и фактических значений не соответствовали полученным положительным оценкам. Высокие значения статистических характеристик для большой заблаговременности прогноза повлияли на оценку точности прогноза.

Методы исследования и исходные данные

Сложность и разнообразие условий формирования водного и ледового режимов водных объектов стали причиной появления многих методов и способов прогноза гидрологических явлений. В настоящее время учесть все многообразие факторов практически невозможно. Гидрологические прогнозы не являются совершенно точными, и при их выпуске устанавливается вероятность возможных ошибок. К основным методам прогнозирования водности крупных рек можно отнести следующие [4]: методы тенденций (линейной и нелинейной); метод соответственных уровней (расходов) воды; метод Калинина–Милокова (по характерным участкам).

Для оценки прогноза и прогнозной методики существует также множество способов и критериев, самые распространенные — метод ГМЦ, критерий Нэша–Сатклиффа [2].

Методы прогноза были проанализированы с точки зрения применимости к крупным рекам и выбраны методы, позволяющие получить наиболее оптимальные результаты и требующие небольшого объема исходной информации. Для краткосрочного прогнозирования расходов воды на реках бассейна р. Иртыш такими методами являются методы линейной и нелинейной тенденции.

Метод тенденции учитывает такое свойство гидрологических явлений, как сохранение направления изменения хода уровней или расходов воды в течение некоторого времени. Это свойство особенно присуще крупным рекам, к ним как раз относится река Иртыш и ее притоки, на которых сток формируется с различных частей бассейна и в ходе половодья отмечаются продолжительные и плавные периоды подъема и спада.

На рис. 1 представлена схема расположения гидрологических постов на р. Иртыш и ее крупных притоках.

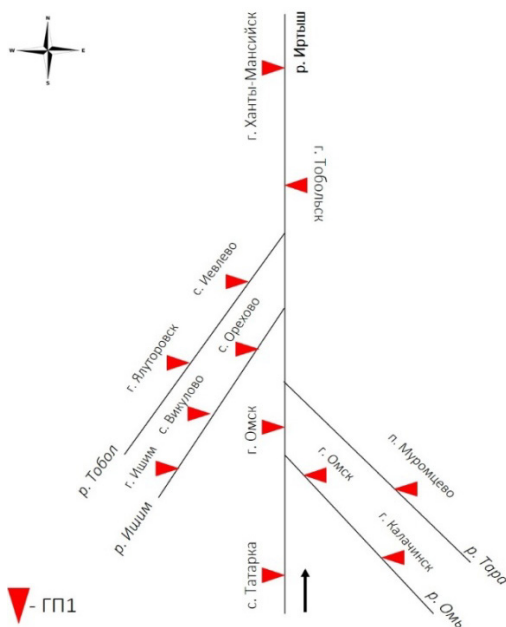


Рис. 1. Схема расположения гидрологических постов на реке Иртыш и ее притоках

В качестве исследуемых водосборов были выбраны следующие: р. Омь (правобережный приток) и р. Тобол (левобережный приток). На территории бассейнов данных рек происходят затопления в период весенне-летнего половодья. Реки Тобол и Омь не зарегулированы, и это позволяет оценить их естественный гидрологический режим.

В данном исследовании был произведен прогноз расходов воды весеннего половодья на двух крупных притоках реки Иртыш — р. Тобол и р. Омь. Площадь водосбора рек составляет 333 000 и 52 400 км² соответственно. Расчет проводился по двум постам, которые расположены на притоках р. Иртыш: с. Иевлево (р. Тобол) и г. Омск (р. Омь).

На основе среднесуточных расходов воды были построены хронологические графики и выделена фаза весеннего половодья для каждого года из рассматриваемого периода с 2016 по 2021 г. [5].

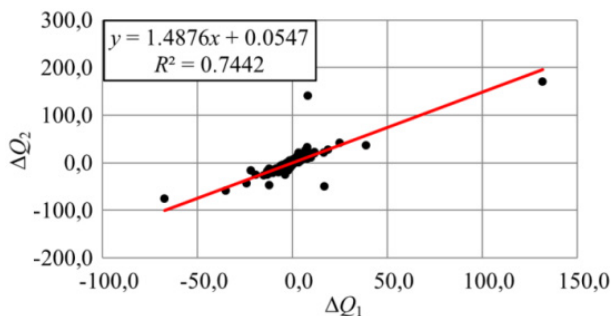
Результаты исследования

Поверочные прогнозы расходов воды рек методом линейной тенденции

В качестве примера рассмотрим прогноз расходов воды (Q) весеннего половодья с заблаговременностью $\tau = 1$ сут за 2021 г. на посту р. Омь – г. Омск. За весеннее половодье на посту за период 2016–2020 гг. была построена зависимость односуточных и двухсуточных изменений $\Delta Q_2 = f(\Delta Q_1)$, по которой определялось прогнозное уравнение (см., например, рис. 2). Прогнозное уравнение использовалось для поверочного прогноза на 2021 г.

Для оценки оправдываемости каждого отдельного прогноза использовался метод ГМЦ: сравнивалась погрешность прогноза δ с допустимой погрешностью $\delta_{\text{доп}}$ ($\delta_{\text{доп}} = \pm 0,674\sigma_{\Delta}$, где σ_{Δ} — среднеквадратическое отклонение изменений прогнозируемой величины за период заблаговременности).

Оценка эффективности прогнозной методики производилась методом ГМЦ и по критерию Нэша–Сатклиффа (NSE) [6], также рассчитывалась обеспеченность методики прогноза P . Пример результатов представлен в табл. 1.


 Рис. 2. Прогнозная зависимость $\Delta Q_1 = f(\Delta Q_2)$

На рис.3 показаны совместные графики фактических и прогнозных значений расходов воды весеннего половодья за 2021 г. на посту р. Омь – г. Омск.

Поверочные прогнозы были выполнены с различной заблаговременностью от суток до 9 суток. Аналогичные результаты были получены и для второго рассматриваемого водосбора р. Тобол.

Таблица 1

Оценка эффективности метода линейной тенденции

Метод/ критерий	ГМЦ		NSE	P, %
	S	S/σ _Δ		
Условие эффективности	S/σ _Δ < 0,8 для ряда более 25 членов		NSE → 1	P ≥ 75
Заблаговременность 1 сут				
Показатель	2,1	0,30	0,98	96
Результат	Методика эффективна		Методика эффективна	Методика эффективна
Заблаговременность 9 сут				
Показатель	19,4	0,48	0,81	85
Результат	Методика эффективна		Методика эффективна	Методика эффективна

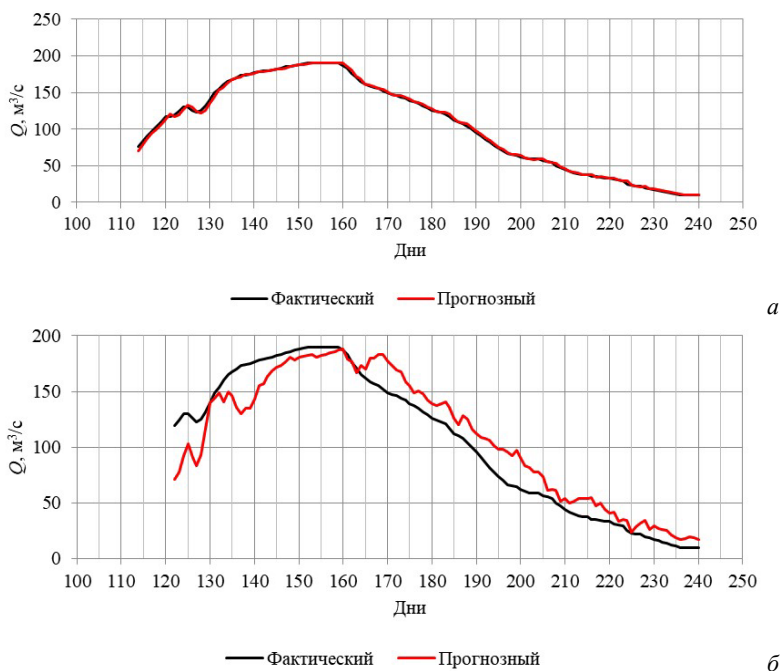


Рис. 3. Сопоставление фактических и прогнозных значений расходов воды весеннего половодья р. Омь – г. Омск: заблаговременность равна 1 (а) и 9 сут (б)

Поверочные прогнозы расходов воды рек методом нелинейной тенденции

Метод нелинейной тенденции подходит для прогнозирования на крупных реках, при расчете определяется продолжительность кривой спада половодья (паводка).

По результатам гидрометрических наблюдений на исследуемых водотоках длительность половодья в среднем составляет 140–160 дней, из них спад половодья после наступления максимума может продолжаться от 50 дней. Половодья на реках Омь и Тобол относятся по типу к затяжным.

Для расчета прогнозных значений расходов воды после прохождения максимума и определения продолжительности

спада на посту р. Тобол – с. Иевлево были применены формулы Нежиховского для лесных водосборов [4].

Результаты метода нелинейной тенденции относятся к неудовлетворительным: была получена большая погрешность в определении продолжительности спада половодий за период с 2016 по 2021 г., фактические и прогнозные значения расходов воды имели значительные расхождения, с завышением последних. Анализ алгоритма прогноза и результатов позволяет сделать вывод о необходимости корректировки коэффициентов в расчетных формулах, которые должны учитывать современные природные условия и возможную антропогенную нагрузку на рассматриваемых водосборах крупных рек [7, 8].

Был произведен подбор коэффициентов для расчетных формул, и получены удовлетворительные результаты прогноза, но остался открытым вопрос о физическом смысле подобранных коэффициентов. Данный вопрос требует дополнительных исследований.

Анализ полученных результатов

По результатам прогнозов были выявлены некоторые моменты при оценке эффективности методики методом ГМЦ: при увеличении заблаговременности эффективность оставалась удовлетворительной, хотя происходила сдвигка прогнозного графика и полученные значения намного отличались от фактических (рис. 3, б). Это объясняется тем, что происходит увеличение среднеквадратической погрешности S и увеличение значения σ_{Δ} , а следовательно, соотношение S/σ_{Δ} остается примерно одинаковым и меньше критического значения 0,8 при длине ряда более 25 членов. Примеры значений при различной заблаговременности показаны в табл. 1.

На рис. 4 в качестве примера показан график изменения критерия S/σ_{Δ} при изменении заблаговременности от 1 до 9 сут. Изменение критерия незначительно, и результат считается удовлетворительным, поскольку полученные значения меньше 0,8. Критерий говорит о хорошем результате и оправ-

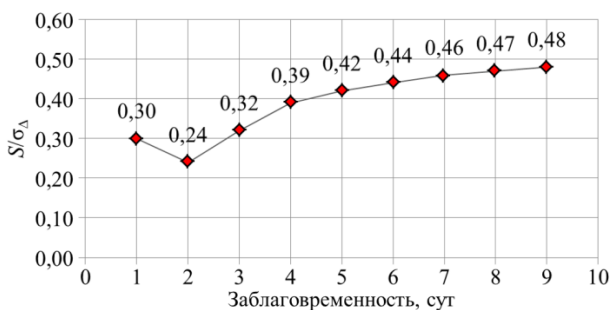


Рис. 4. График изменения оценки эффективности по методу ГМЦ (пост р. Омь – г. Омск)

дываемости прогноза расходов воды, но визуально результаты противоположены.

Рассмотрим зарубежные критерии оценки эффективности прогностических методик, которые рекомендует к использованию ВМО [6]. Формулы данных критериев перечислены ниже:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{Q}_i - Q_i|, \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N |\hat{Q}_i - Q_i|^2}{N}}, \quad (2)$$

$$AAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\hat{Q}_i - Q_i}{Q_i} \right|, \quad (3)$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^N \hat{Q}_i}{\sum_{i=1}^N Q_i}, \quad (4)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \hat{Q}_i)}{\sum_{i=1}^N Q_i}, \quad (5)$$

где \hat{Q}_i — прогнозное значение расхода воды; Q_i — фактическое значение расхода воды; N — число прогнозов.

На рис. 5 показан пример изменения значений критерия Байеса, которые резко уменьшаются, начиная с заблаговременности 3 суток ($\text{BIAS} \in (0, \infty)$, $\text{BIAS} = 0$ — удовлетворительно, $\text{BIAS} = 1$ — хорошо, $\text{BIAS} > 1$ — плохо; $\text{PBIAS} \in (-\infty, \infty)$, $\text{PBIAS} < 0$ — удовлетворительно, $\text{PBIAS} = 0$ — хорошо, $\text{BIAS} > 0$ — плохо).

Одним из оценочных критериев верификации является корреляционная диаграмма [6]. В контексте гидрологических прогнозов она позволяет увидеть взаимосвязь между прогнозными и фактическими значениями. Характеристикой корреляционной диаграммы является коэффициент корреляции Пирсона, который измеряет тесноту линейной связи между значениями.

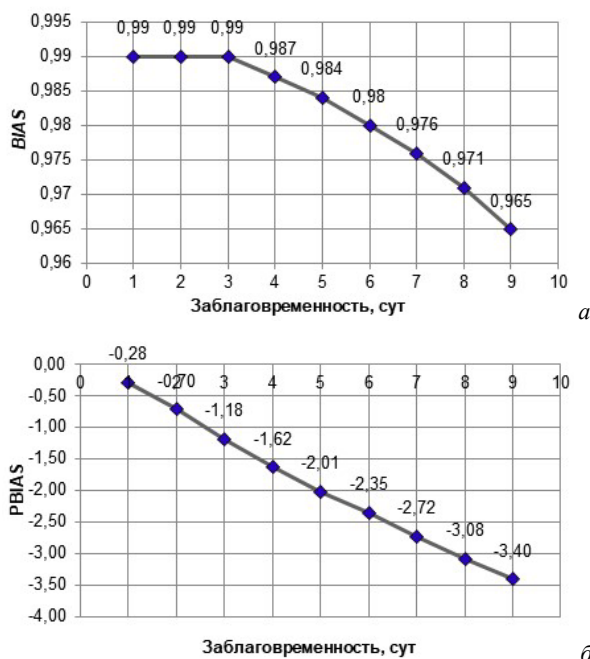


Рис. 5. График изменения критерия оценки эффективности BIAS (a) и PBIAS (б) (пост р. Омь – г. Омск)

Корреляционная диаграмма на рис. 6, *а* говорит о сильной корреляции между прогнозными и фактическими значениями (коэффициент корреляции равен почти 1). Корреляционная диаграмма на рис. 6, *б* также имеет положительные значения коэффициента корреляции, но взаимосвязь между значениями слабая.

Критерии оценки эффективности метода линейной тенденции на реках Омь и Тобол показали следующее: с увеличением заблаговременности качество прогнозных значений будет

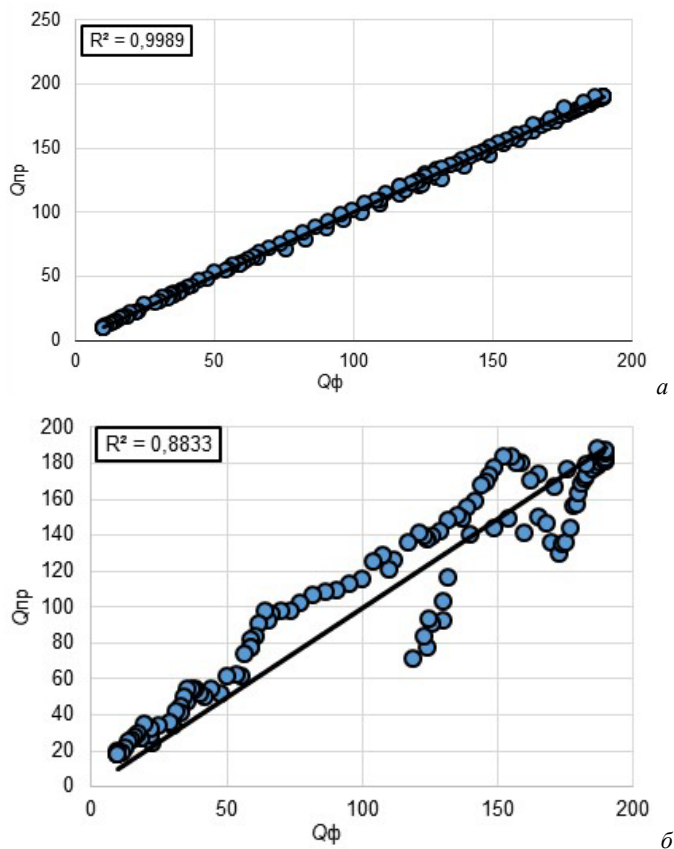


Рис. 6. График корреляции между прогнозными и фактическими значениями, р. Омь – г. Омск: заблаговременность равна 1 (*а*) и 9 сут (*б*)

ухудшаться. Оптимальной заблаговременностью для краткосрочного прогнозирования расходов воды весеннего половодья этих крупных рек будет являться заблаговременность равная 2–3 сут.

Заключение

Методом линейной тенденции были произведены поверочные прогнозы на крупных реках Омь и Тобол (бассейн р. Иртыш) с заблаговременностью от 1 до 9 сут. Прогнозы оценивались методом ГМЦ и критерием Нэша–Сатклиффа. Получено, что при увеличении заблаговременности и высоких значениях статистических характеристик оценка методики показывает положительный результат, в то время как совмещение прогнозных и фактических значений на графиках демонстрирует значительное несоответствие максимумов и минимумов хода расходов воды. Для дальнейшего анализа прогнозов использовались зарубежные критерии и методики. Обосновано, что из всего многообразия критериев для оценки точности и эффективности рекомендуется использовать построение корреляционных диаграмм. Данный способ оценки прогнозов является довольно простым и доступным в использовании, а также обладает наглядностью.

Результаты прогноза по методу нелинейной тенденции показали, что в настоящее время расчетные формулы необходимо оптимизировать, постоянные коэффициенты в расчетных формулах требуют корректировки. В связи с этим предлагается воспользоваться методом подбора коэффициентов с учетом физики происходящих процессов на водосборах для получения точных результатов прогнозных величин.

Литература

1. *Стецев И.В.* К вопросу о наводнениях на реке Иртыш и его притоках // Краеведение Омской области. 2018. № 1 (42). С. 224–227.

2. *Бориц С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В.* Прогнозирование стока рек России. М. : Гидрометцентр России, 2023. 200 с.
3. *Борисов П.В.* Наводнения в бассейне реки Иртыш // Межвузовская научная географическая конференция. Омск, 1969.
4. *Гайдюкова Е.В., Викторова Н.В.* Гидрологические прогнозы. Конспект лекций. СПб. : РГГМУ, 2021. 92 с.
5. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) [электронный ресурс]. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения: 02.02.2024).
6. Руководство по гидрологической практике: Том II – Управление водными ресурсами и практика применения гидрологических методов (ВМО-№ 168). Женева, 2012. 324 с.
7. *Козыкеева А.Т., Мустафаев Ж.С., Тастемирова Б.Е.* Особенности формирования гидрологического режима водосбора бассейна реки Тобол // Материалы Всероссийской научно-практической конференции (Шумаковские чтения) с международным участием. Вып. 16. Ч. 1. Новочеркасск : ООО «Лик», 2018. С. 173–178.
8. *Миронов И.О., Петров Е.Ф.* Анализ изменения гидрологического режима реки Омь // Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию образования кафедры почвоведения. Омск : ФГБОУ ВО Омский ГАУ, 2020. С. 306–310.

УДК 556.06

DOI: 10.55235/0320359X_2025_109_151

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЕРАТИВНЫХ ИСПЫТАНИЙ МЕТОДА ПРОГНОЗА ПРИТОКА ВОДЫ В НОВОСИБИРСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

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

*Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт, Новосибирск*

Приведены результаты оперативных испытаний метода прогноза притока воды в Новосибирское водохранилище, созданного в рамках выполнения темы 1.2.3 Плана НИТР Росгидромета на 2020–2024 гг. Решением секции Технического совета ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» от 22 октября 2024 г. и ЦМКП от 18 ноября 2024 г. метод рекомендован к внедрению в оперативную практику специалистов Гидрометцентра ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» в качестве консультативного.

Ключевые слова: водохранилище, Новосибирск, приток, модель, прогноз, результаты

RESULTS OF OPERATIONAL TESTS OF THE METHOD OF FORECASTING WATER INFLOW INTO THE NOVOSIBIRSK RESERVOIR

N.N. Zavalishin, A.V. Ignatov, E.G. Bochkareva,
V.V. Gololobov, N.V. Palchikova

Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute, Novosibirsk

The article presents the results of operational testing of the method for forecasting water inflow into the Novosibirsk Reservoir, developed as part of the implementation of topic 1.2.3 of the Roshydromet R&D Plan for 2020–2024. By the decision of the Technical Council Section of the West Siberian Administration for Hydrometeorology and Environmental Monitoring dated October 22, 2024 and Central Methodological Commission for Hydrometeorological and Heliogeophysical Forecasts dated November 18, 2024, the method was recommended for implementation into the operational practice of specialists of the Hydrometeorological Center of the West Siberian UGMS as an advisory one.

Keywords: reservoir, Novosibirsk, inflow, model, forecast, results

С момента создания и наполнения Новосибирского водохранилища в 1957–1959 гг. возникла проблема прогноза гидрографа притока воды, особенно во II–III кварталах. Результаты работ Ш.А. Харшана были первой попыткой решения проблемы [1], и до настоящего времени его метод применяется в оперативной работе специалистами Гидрометцентра Западно-Сибирского УГМС. Известен подход Д.А. Буракова с соавторами [2], метод прогноза которого опирается на спутниковую информацию. В работах В.В. Еремина применяется физико-статистический подход с применением главных компонент для прогноза гидрографа [3]. Отметим также исследования В.А. Понько, который искал гармонические компоненты в динамике притока воды в водохранилище, обусловленные как земными, так и космическими причинами [4, 5]. Упомянем ещё работу Л.Н. Романова с коллегами [6], в которой они строят метод прогноза на основе минимизации среднего риска.

Новый метод прогноза притока воды в Новосибирское водохранилище на II–III кварталы разработан в рамках выполнения темы 1.2.3 Плана НИОКР Росгидромета на 2020–2024 гг. (авторы — Н.Н. Завалишин, А.В. Игнатов).

Результаты испытаний нового метода прогноза за 2022–2023 гг. были сделаны в статье [7]. Но в связи с продлением испытаний на 2024 г. возникла необходимость учесть и результаты последнего гола.

Для решения поставленной задачи используются метеорологические данные по водосбору реки Оби, в частности суммы осадков месячного разрешения по сети ГМС, находящихся в водосборе Верхней Оби: Кош-Агач, Усть-Кокса, Онгудай, Чемал, Бийск, Барнаул, Новосибирск. По этой же сети берутся данные о температуре нижней атмосферы. Кроме того, в качестве возможных предикторов рассматриваются расходы воды декадного разрешения по постам: Обь-Камень-на-Оби, Обь-Барнаул, Бия-Бийск, Катунь-Сростки, Бердь-Старый Искитим, Чумыш-Тальменка.

Метод состоит из двух этапов. Первый этап — долгосрочный прогноз гидрографа притока воды на II–III кварталы с месячной и декадной детализацией на основе модели аддитивных гармоник, которая включена в технологию «Кассандра-Сибирь» [8, 9]. Прогноз выдается до 25 марта. Программа вычисления долгосрочных прогнозов установлена на компьютер Гидрометцентра Западно-Сибирского УГМС и применялась специалистами при расчете долгосрочного прогноза гидрографа в 2025 г.

Второй этап — применение технологии «Стохастическое моделирование» к уточненным прогнозам декадного и месячного разрешения притока воды в Новосибирское водохранилище на II–III кварталы [10, 11].

Таблица 1

Оправдываемость прогнозов среднеквартального притока воды в Новосибирское водохранилище за период производственных испытаний в 2023–2024 гг.

Период	$\delta_{\text{доп}}$	Факт, м ³ /с	Прогноз по методу	Ошибка	Оценка	Оперативный прогноз	Ошибка	Оценка
2023								
2 кв.	460	3000	3821	–821	неопр.	3650	–650	неопр.
3 кв.	358	2000	2150	–150	опр.			
Выпущено/ оправдалось			2/1			1/0		
Оправдываемость, %			50			0		
2024								
2 кв.	460	4190	3890	300	опр.	3600	590	неопр.
3 кв.	358	2230	2050	180	опр.			
Выпущено/ оправдалось			2/2			1/0		
Оправдываемость, %			100			0		
Всего % оправдываемости			75			0		

Таблица 2

**Оправдываемость прогноза гидрографа среднего притока воды
в Новосибирское водохранилище на второй квартал с месячным
разрешением за период производственных испытаний в 2022–2024 гг.**

Период	δ _{доп}	Факт, м ³ /с	Прогноз по методу	Ошиб-ка	Оцен-ка	Консульта-ция ГМЦ	Ошиб-ка	Оцен-ка
2022								
апрель	560	2530	2580	50	опр.	2450	80	опр.
май	600	2840	3120	–280	опр.	3400	–560	опр.
июнь	600	2710	3340	–630	опр.	3150	–440	опр.
Выпуще-но/оправдалось			3/3			3/3		
Оправдываемость, %			100			100		
2023								
апрель	560	1930	3350	–1420	не-опр.	3200	–1270	неопр.
май	600	3330	3940	–610	опр.	3900	–570	опр.
июнь	600	3750	3790	–40	опр.	3850	100	опр.
П квар- тал	400	3000	3690	–690	не-опр.	3650	–650	неопр.
Выпуще-но/оправдалось			4/2			4/2		
Оправдываемость, %			50			50		
2024								
апрель	560	3750	2648	1102	не-опр.	2650	1100	неопр.
май	600	3940	4796	–856	не-опр.	4050	–110	опр.
июнь	600	4870	4223	647	не-опр.	4100	770	неопр.
П квар- тал	400	4190	3890	300	опр.	3600	590	неопр.
Выпуще-но/оправдалось			4/1			4/1		
Оправдываемость, %			25			25		
Всего			11/6 55%			11/6 55%		

Таблица 3

Оправдываемость прогноза гидрографа среднего притока воды в Новосибирское водохранилище в третьем квартале с месячным разрешением за период производственных испытаний в 2022–2024 гг.

Период	δ _{доп}	Факт, м ³ /с	Прогноз по методу	Ошибка	Оценка
2022					
июль	633	1710	2660	–950	неопр.
август	384	1440	1820	–380	опр.
сентябрь	281	914	1160	–246	опр.
Выпущено/оправдалось			3/2		
Оправдываемость, %			67		
2023					
июль	633	2700	3200	–500	опр.
август	384	1860	1520	340	опр.
сентябрь	281	1450	1230	220	опр.
Выпущено/оправдалось			3/3		
Оправдываемость, %			100		
2024					
июль	633	3160	2680	480	опр.
август	384	1760	1910	–150	опр.
сентябрь	281	1760	1560	200	опр.
Выпущено/оправдалось			3/3		
Оправдываемость, %			100		
Всего			9/8 89		

За период испытаний авторами было предоставлено 3 долгосрочных прогноза гидрографа притока воды в Новосибирское водохранилище на II и III кварталы с квартальным, месячным и декадным разрешением, 54 краткосрочных, 24 долгосрочных прогноза (18 основных, 6 уточнённых).

Оперативные испытания проводились три года: 2022–2024 гг. Была произведена оценка оправдываемости долго-

Таблица 4

**Оправдываемость (опр.) уточненных прогнозов среднедекадного
притока воды в Новосибирское водохранилище за период
производственных испытаний**

Годы	Прогноз по методу	Оперативный прогноз
2022	выпущено	18
	оправдалось	18
	% опр.	100
2023	выпущено	18
	оправдалось	18
	% опр.	100
2024	выпущено	18
	оправдалось	18
	% опр.	100
Всего	выпущено	54
	оправдалось	54
	% опр.	100

срочных и краткосрочных прогнозов притока воды в Новосибирское водохранилище в соответствии с [12, 13].

Оправдываемость долгосрочного прогноза гидрографа притока воды в Новосибирское водохранилище во II–III квартале по методу составила 75 % по сравнению с оправдываемостью оперативных консультаций за II квартал — 0 % (табл. 1).

Оправдываемость долгосрочного прогноза гидрографа притока воды во II квартале с месячным разрешением за период производственных испытаний составила 55 % по сравнению с оправдываемостью оперативных консультаций 55 % (табл. 2). По III кварталу оправдываемость по методу 89 % (табл. 3). По оперативным консультациям прогноз на III квартал с такой заблаговременностью не выдается.

Гидрограф декадного разрешения притока воды по методу (первый этап) имеет низкую оправдываемость.

Таблица 5

**Оправдываемость уточненных прогнозов среднесеasonного
притока воды в Новосибирское водохранилище за период
производственных испытаний**

Период	$\delta_{\text{доп}}$	Факт, м ³ /с	Прогноз по методу	Ошибка	Оценка	Оператив- ный прогноз	Ошибка	Оценка
2022								
Апр.	616	2530	2380	150	опр.	2450	80	опр.
Май	819	2840	3570	-730	опр.	3400	-560	опр.
Июнь	751	2710	2590	120	опр.	2450	260	опр.
Июль	619	1710	1700	10	опр.	1630	80	опр.
Авг.	372	1440	1720	-280	опр.	1420	20	опр.
Сент.	260	914	1100	-186	опр.	970	-56	опр.
Выпущено/оправдалось			6/6			6/6		
Оправдываемость, %			100			100		
2023								
Апр.	616	1930	3400	-1470	неопр.	2650	-720	неопр.
Май	819	3330	4330	-1000	неопр.	3750	420	опр.
Июнь	751	3750	3900	-150	опр.	3450	-300	опр.
Июль	619	2700	3100	-400	опр.	2700	0	опр.
Авг.	372	1860	1770	90	опр.	1570	-290	опр.
Сент.	260	1450	1440	10	опр.	1450	0	опр.
Выпущено/оправдалось			6/4			6/5		
Оправдываемость, %			67			83		
2024								
Апр.	616	3750	2900	850	неопр.	2650	1100	неопр.
Май	819	3940	3490	450	опр.	3680	260	опр.
Июнь	751	4880	3390	1490	неопр.	3850	1030	неопр.
Июль	619	3160	3600	-440	опр.	3300	-140	опр.
Авг.	372	1760	1800	-40	опр.	1870	-110	опр.
Сент.	372	1760	1310	450		1280	480	неопр.
Выпущено/оправдалось			6/3			6/3		
Оправдываемость, %			50			50		
Всего			18/13 72			18/14 77		

Оправдываемость уточненных прогнозов среднедекадного притока воды в Новосибирское водохранилище за три года по методу составила 89 %. Оправдываемость оперативных консультаций притока воды в Новосибирское водохранилище — 100 % (табл. 4).

Оправдываемость уточненных долгосрочных прогнозов среднемесячного притока воды в Новосибирское водохранилище за три года по методу составила 72 %. Оправдываемость оперативных консультаций среднемесячного притока воды в Новосибирское водохранилище — 77 % (табл. 5)

Полное изложение теоретической части метода прогноза притока воды в Новосибирское водохранилище представлено в статье [7].

Итоги испытаний метода долгосрочного гидрометеорологического прогноза притока воды в Новосибирское водохранилище рассмотрены на секции Технического совета Западно-Сибирского УГМС 22 октября 2024 г. Решением секции метод долгосрочного прогноза гидрографа на II–III квартал принят в оперативную работу в качестве консультативного метода. Решение секции было одобрено и утверждено на заседании ЦМКП 18 ноября 2024 г.

Авторы выражают благодарность начальнику отдела гидрологических прогнозов Гидрометцентра Западно-Сибирского УГМС В.Ф. Богдановой за ее труд по оценке качества прогнозов нового метода.

Литература

1. *Харшан Ш.А.* Долгосрочные прогнозы стока половодья горных рек Сибири. М. : Гидрометеиздат, 1958. 78 с.
2. *Бураков Д.А., Копылов В.Н., Ромасько В.Ю., Швецова Е.В.* Информационная технология прогноза весеннего половодья Сибирских рек на основе математического моделирования процесса формирования стока // Информационные системы и технологии. 2009. № 3 (53). С. 64–69.

3. *Еремин В.В.* Автоматизированная система физико-статистического долгосрочного прогноза // Труды ЗапСибНИГМИ. 1978. Вып. 34. С. 54–59.
4. *Понько В.А.* Система «Экопрогноз»: Способы оценки и прогнозирования природных аномалий. Новосибирск : Науч. центр «Экопрогноз», 1996. 95 с.
5. *Винокуров Ю.И., Понько В.А.* Геокосмические связи в прогнозировании аномалий климата и водных ресурсов // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы : Тезисы докладов XIX Международного симпозиума. 2013. С. 10.
6. *Романов Л.Н., Бочкарева Е.Г., Богданова В.Ф.* Гидрологический долгосрочный прогноз в условиях Новосибирского водохранилища // Труды Сибирского регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института. 2011. Вып. 106. С. 89–102.
7. *Завалишин Н.Н., Игнатов А.В., Бочкарева Е.Г., Пальчикова Н.В.* Прогнозирование квартального, месячного и декадного притока в Новосибирское водохранилище // Сборник материалов Международной научной конференции «Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2023». Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрии, мониторинг окружающей среды, геоэкология. 2023. Т. 4, № 1. С. 63–69.
8. *Завалишин Н.Н.* Программа аппроксимации дискретного ряда аддитивным набором периодических функций. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2019664582. Дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 08.11.2019.
9. *Завалишин Н.Н.* Инструкция по работе с программными средствами технологии «Кассандра-Сибирь». Новосибирск : СибНИГМИ, 2010. 45 с.
10. *Игнатов А.В.* Стохастическое моделирование. Версия 2. Поиск эмпирических закономерностей. Свидетельство о государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ № RU 2018660076. Дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 16.08.2018 г.
11. *Игнатов А.В.* Руководство пользователя программы «Стохастическое моделирование». Иркутск : Изд-во ИГ СО РАН, 2019. 217 с.
12. Наставление по службе прогнозов, разд. 3, ч. 1. Ленинград, 1962.
13. РД 52.27.284.91: Методические указания по проведению производственных испытаний. Росгидромет, 1992.

**РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ
ГИДРОХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА УЧАСТКОВ
РЕК ОБСКОГО БАССЕЙНА С МИНИМАЛЬНОЙ
АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКОЙ**

А.О. Даниленко, Д.Е. Коваленко

ФГБУ «Гидрохимический институт», Ростов-на-Дону

В статье описаны региональные особенности гидрохимического режима участков рек Обского бассейна, подверженных минимальной антропогенной нагрузке (эталонных участков). Показано, что природные факторы могут приводить к снижению качества воды на этих участках за счет повышенного поступления органических веществ, азота аммонийного, соединений тяжелых металлов, фенолов и нефтепродуктов. При этом эталонные участки рек Тым, Вах, Большой Юган и Сыня существенно отличаются от остальных более высокими концентрациями загрязняющих веществ. Дана оценка стационарности гидрохимического режима за последние 15 лет по авторской методике. Показано, что, несмотря на превышение некоторых нормативов качества воды, эталонные участки в бассейне р. Обь характеризуются в основном ненарушенным или слабо нарушенным гидрохимическим режимом, исключая реки Сарала и Сыня.

Ключевые слова: гидрохимический режим, эталонные участки водных объектов, бассейн реки Обь, концентрации растворенных веществ, качество воды

**REGIONAL PECULIARITIES
OF THE HYDROCHEMICAL REGIME OF RIVER
SECTIONS WITH MINIMAL ANTHROPOGENIC
LOAD IN THE OB BASIN**

A.O. Danilenko, D.E. Kovalenko

Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don

The article describes regional peculiarities of hydrochemical regime of river sections of the Ob basin subjected to minimal anthropogenic load (reference sites). It is shown that natural factors can lead to a decrease in

water quality at these sites due to increased input of organic substances, ammonium nitrogen, heavy metal compounds, phenols and oil products. At the same time, the reference sites of the Tym, Vakh, Bolshoi Yugan and Synya rivers differ significantly from the others by higher concentrations of pollutants. The stationarity of the hydrochemical regime over the last 15 years was assessed using the author's methodology. It is shown that despite exceeding some water quality standards, the reference sites in the Ob River basin are characterised by mainly undisturbed or slightly disturbed hydrochemical regime, excluding the Sarala and Synya rivers.

Keywords: hydrochemical regime, reference sites of water bodies, Ob River basin, concentrations of dissolved substances, water quality

Введение

Река Обь является важнейшей водной артерией Западной Сибири — региона с огромным ресурсным потенциалом, активное освоение которого сопровождается высокой техногенной нагрузкой на водные объекты. Большая часть водосборного бассейна Оби приходится на крупный Западно-Сибирский нефтегазоносный бассейн, где происходит интенсивная нефть- и газодобыча. В результате антропогенного воздействия степень загрязненности воды р. Обь и состояние её водных экосистем ухудшаются от истока к устью [1]. Однако в Обском бассейне концентрации растворенных веществ могут регулярно превышать нормативы качества воды даже на участках рек, где антропогенная нагрузка минимальна (на эталонных участках согласно СКИОВО р. Обь) [2].

Гидрохимический режим эталонных участков рек устойчив во времени, так как обусловлен комплексом разнообразных постоянно действующих и, как правило, неустраняемых естественных причин, под действием которых наблюдается взаимопогашение отклонений гидрохимических показателей за счет взаимной компенсации поступления, удаления и превращения веществ и энергии [3]. Изменчивость гидрохимического режима в таком случае является «собственной», то есть внутренне ему присущей. Относительное постоянство гидрохимического режима — признак его стационарности.

При антропогенном воздействии на водный объект на изменчивость его гидрохимического режима начинают влиять так называемые «специальные» причины, нарушающие его стационарность, что проявляется в регулярном появлении высоких концентраций растворённых веществ и в формировании тенденций к увеличению или снижению их среднегодовых значений.

Оценка стационарности гидрохимического режима водного объекта позволяет ответить на вопрос, устойчивы ли во времени его региональные гидрохимические особенности и какой диапазон их колебаний является естественным. Кроме того, отсутствие выпусков сточных вод в водный объект или на рельеф еще не говорит об отсутствии антропогенного влияния, которое может реализовываться через диффузное загрязнение. Эталонный участок водного объекта может иметь нарушенный гидрохимический режим, следовательно, свойственные ему повышенные концентрации растворенных веществ уже нельзя считать естественными.

В связи с этим в статье не только охарактеризованы региональные гидрохимические особенности участков рек Обского бассейна с минимальной антропогенной нагрузкой, но и приведены сведения о стационарности их гидрохимического режима, оцененной по авторской методике, основанной на модификации контрольных карт [3].

Материалы и методы

Материалом исследования послужили режимные наблюдения Росгидромета за показателями состава и свойств воды эталонных участков рек с 2008 по 2022 гг. Различают три типа эталонных участков рек по отсутствию выше по течению источников антропогенного воздействия: тип *a* — нет выпусков на рельеф, накопители, поля фильтрации и т.п., а также населенных пунктов и сельхозугодий; тип *б* — есть малые населенные пункты и/или сельхозугодья, но нет выпусков на рельеф.

еф; тип *в* — есть выпуски на рельеф [4]. В данное исследование включены эталонные створы типов *а* и *б* в бассейне р. Обь, представленные в табл. 1.

Таблица 1

**Характеристика эталонных участков рек в бассейне р. Обь
(составлено по [2])**

Координатный номер	Водный объект	Пункт наблюдений	Субъект РФ	УГМС	Тип климата ⁴
Эталонные участки типа <i>а</i>					
513008740	р. Кокши	крд. Кокши	Республика Алтай	ЗС ¹	1
501008550	р. Б. Терехта	с. Терехта	Республика Алтай	ЗС	1
542008720	р. Ср. Терсь	п. Мутное	Кемеровская область	ЗС	2
611008000	р. Вах	с. Ларьяк	ХМАО	ОИ ²	2
Эталонные участки типа <i>б</i>					
511008740	р. Чулышман	п. Балыкча	Республика Алтай	ЗС	1
500008610	р. Катунь	с. Тюнгур	Республика Алтай	ЗС	1
545008910	р. Сарала	пос. Сарала	Республика Хакасия	СС ³	2
553008914	р. Кадат	г. Шарыпово	Красноярский край	СС	2
560008650	р. Алчедат	с. Троицкое	Кемеровская область	ЗС	2
595008150	р. Тым	с. Напас	Томская область	ЗС	2
603007400	р. Большой Юган	с. Угут	ХМАО	ОИ	2
645006350	р. Сыня	п. Овгорт	ЯНАО	ОИ	2

Примечания: ¹ ЗС — ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС». ² ОИ — ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС». ³ СС — ФГБУ «Среднесибирское УГМС». ⁴ Тип климата (гидрологические сезоны при типе климата 1: весна — с 4 по 9 месяц, лето-осень — с 10 по 11 месяц, зима — 12–3 месяц; при типе климата 2: весна — с 4 по 6 месяц, лето-осень — с 7 по 11 месяц, зима — 12–3 месяц).

Особенности гидрохимического режима и его стационарность оценивали по среднегодовым концентрациям растворенных веществ. Чтобы рассчитать среднегодовую концентрацию, сначала отбраковывали выбросы по [5], затем осредняли концентрации по гидрологическим сезонам (см. табл. 1) и вычисляли их среднюю арифметическую.

Стационарность гидрохимического режима оценивали по контрольным диаграммам, построенным на основе данных систематических гидрохимических наблюдений за 15 лет наблюдений (с 2008 по 2022 г.). Контрольная диаграмма (рис. 1) представляет собой двумерную контрольную карту Шухарта [6]. По оси абсцисс (\bar{X} — среднегодовая концентрация вещества) оценивается карта положений, а по оси ординат ($\Delta\bar{X}$ — скользящий размах среднегодовых концентраций между текущим и предыдущим годом) — карта изменчивости. Кроме того, контрольная диаграмма имеет опорное значение, вертикальные и горизонтальные контрольные границы, точки с координатами (\bar{X} ; $\Delta\bar{X}$) и линию регрессии $\Delta\bar{X} = a\bar{X} + b$.

Опорное значение контрольной диаграммы рассчитывается по уравнению регрессии при $\Delta\bar{X} = 0$. Это наиболее характерная для водного объекта среднегодовая концентрация. Вертикаль-

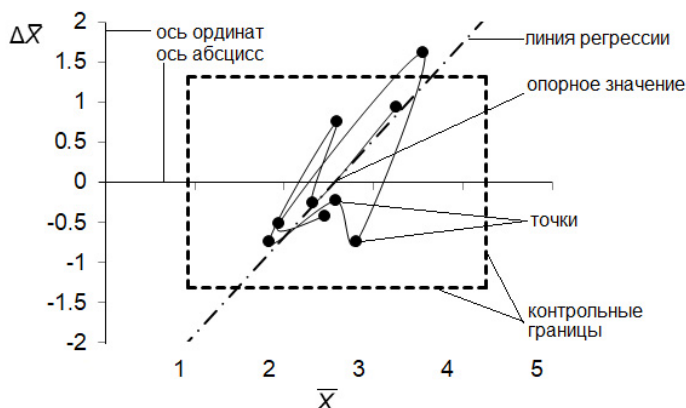


Рис. 1. Контрольная диаграмма и её элементы

ные контрольные границы наносятся на контрольную диаграмму перпендикулярно оси абсцисс по обе стороны от опорного значения на расстоянии $\pm 3\sigma$, где σ — стандартное отклонение выборки среднегодовых концентраций вещества. Горизонтальные контрольные границы наносятся на диаграмму параллельно оси абсцисс по обе стороны на расстоянии $\pm 3,267 < \Delta \bar{X} >$, где $< \Delta \bar{X} >$ — средний скользящий размах среднегодовых концентраций вещества. Точки наносят по координатам $(\bar{X}; \Delta \bar{X})$ и последовательно объединяют. Точки могут формировать типовые структуры, которые позволяют обнаружить нарушение стационарности гидрохимического режима водного объекта.

Наличие типовых структур точек подтверждают контрольными критериями:

- критерий 1 — проверка наличия среднегодовых концентраций за вертикальными контрольными границами $\pm 3\sigma$ (по аналогии с основным критерием проверки контрольных карт Шухарта [2]);

- критерий 2 — проверка гипотезы о неслучайности ряда среднегодовых концентраций по критерию серий, основанному на медиане выборки;

- критерий 3 — проверка наличия статистически значимого линейного тренда среднегодовых концентраций.

Результаты контрольных критериев трактуются согласно табл. 2.

Таблица 2

Интерпретация результатов контрольных критериев

Гидрохимический режим	Критерий 1	Критерий 2	Критерий 3
Стационарный	–	–	–
Нарушение стационарности:			
а) эпизодическое	+	–	–
б) периодическое	+ или –	+	–
в) хроническое	+ или –	+ или –	+

К наиболее серьезному нарушению стационарности гидрохимического режима относится появление тренда среднегодовых концентраций вещества. Возрастающий тренд может складываться в результате хронического, как правило, антропогенного воздействия на качество воды водного объекта, с которым не справляются присущие ему процессы самоочищения. Убывающий тренд также относят к наиболее серьезным нарушениям стационарности гидрохимического режима, хотя с точки зрения качества воды речь идет о постепенном улучшении и восстановлении естественных параметров.

К менее серьезному нарушению гидрохимического режима относят смещение среднегодовых значений загрязняющего вещества относительно его опорного значения. Такой тип нарушения может свидетельствовать о периодическом антропогенном воздействии на качество воды водного объекта, которое привело к установлению новых, отличных от естественных, границ гидрохимического режима в отдельном многолетии.

К наименее серьезному нарушению гидрохимического режима относят влияние специальной причины изменчивости гидрохимического режима в один год рассматриваемого периода. Такой тип нарушения может свидетельствовать о кратковременном сильном антропогенном воздействии на качество воды водного объекта, которое не было скомпенсировано процессами самоочищения в отдельный год или сезон года.

Контрольная диаграмма строится для каждого интересующего показателя состава и свойств воды и позволяет оценить стационарность гидрохимического режима водного объекта по отдельному веществу. Комплексная оценка нестационарности (нарушенности) гидрохимического режима выполняется по нескольким показателям состава и свойств воды, включая обязательные (кальций, магний, хлориды, сульфаты, БПК₅, ХПК, азот аммонийный, азот нитратный, фосфор фосфатный, железо общее, медь, цинк, марганец и нефтепродукты) и рекомен-

дуге, которые характерны для определенных водных объектов и имеют локальное значение.

Чтобы выполнить комплексную оценку нестационарности гидрохимического режима, необходимо вычислить долю D и степень нарушенности S гидрохимического режима водного объекта для расчета коэффициента нестационарности гидрохимического режима K_{DS} по формуле

$$K_{DS} = D S.$$

Под долей нарушенности гидрохимического режима понимают количество показателей с нарушенным режимом в общем количестве проанализированных показателей. D рассчитывается по формуле

$$D = A' / A,$$

где A' — количество показателей состава и свойств воды, для которых выявлено нарушение стационарности гидрохимического режима; A — общее количество показателей состава и свойств воды, по которым выполнена оценка стационарности гидрохимического режима.

Величина S рассчитывается по формуле

$$S = \frac{A_3}{A'} + D^{-0,375} \cdot \left(\frac{0,8868A_{\text{п}} + 1,1824A_{\text{х}}}{A'} \right),$$

где A_3 — эпизодическое нарушение; $A_{\text{п}}$ — периодическое нарушение; $A_{\text{х}}$ — хроническое нарушение; D — доля нарушенности гидрохимического режима.

Нестационарность гидрохимического режима по значениям K_{DS} трактуется согласно табл. 3.

Результаты и обсуждение

Характеристика гидрохимических особенностей эталонных участков рек в бассейне р. Обь представлена в табл. 4 и 5 в виде среднестатистических значений (средняя среднегодовых концентраций) с диапазонами их изменчивости ($\pm 3\sigma$). При анализе

Таблица 3

**Оценка нарушенности гидрохимического режима
по величине коэффициента нестационарности K_{DS}**

Значение K_{DS}	Нарушенность гидрохимического режима
$\leq 0,25$	Ненарушенный
0,26–0,40	Слабо нарушенный
0,41–0,60	Умеренно нарушенный
0,61–0,85	Нарушенный
$\geq 0,86$	Сильно нарушенный

Таблица 4

**Особенности содержания главных ионов и тяжелых металлов в эталонных
участках рек Обского бассейна (в ячейках таблицы результаты
представлены в виде среднемноголетнего значения концентраций
и диапазона изменчивости среднегодовых концентраций ($\pm 3\sigma$)
растворенного вещества)**

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Эта- лонный участок реки	Mg, мг/л	Ca, мг/л	Cl, мг/л	SO ₄ , мг/л	Fe, мг/л	Cu, мкг/л	Zn, мкг/л	Mn, мкг/л
	Нормативные концентрации							
	40	180	300	100	0,1	1	10	10
Кокши	1,92; н.о.– 4,58	8,84; н.о.– 23,26	0,66; н.о.– 1,56	5,19; 1,96– 8,43	0,03; н.о.– 0,09	н.д.	н.д.	н.д.
Большая Терехта	3,96; 1,78– 6,12	23,86; 18,19– 29,54	0,76; н.о.– 1,62	8,64; н.о.– 18,92	0,01; н.о.– 0,05	н.д.	н.д.	н.д.
Средняя Терсь	2,39; н.о.– 4,93	8,02; 4,80– 11,24	1,21; н.о.– 2,37	7,48; н.о.– 21,04	0,11; 0,01– 0,20	0,49; н.о.– 1,81	1,82; н.о.– 6,59	9,03; н.о.– 30,38
Вах	4,72; н.о.– 13,41	9,58; н.о.– 19,75	4,92; н.о.– 14,63	6,39; н.о.– 18,31	1,2; н.о.– 2,59	6,91; н.о.– 16,65	32,98; н.о.– 96,47	123,42; н.о.– 250,64
Чулыш- ман	4,75; 2,32– 7,17	22,33; 15,86– 28,79	1,11; н.о.– 2,68	8,65; 5,16– 12,15	0,03; н.о.– 0,07	н.д.	н.д.	н.д.

Продолжение табл. 4

Катунь	4,03; 1,05– 7,02	23,32; 15,39– 31,25	0,73; н.о.– 1,65	7,71; 2,24– 13,18	0,03; н.о.– 0,11	1,13; н.о.– 3,11	11,39; н.о.– 48,84	н.д.
Сарала	6,09; 3,14– 9,04	25,52; 10,10– 40,95	2,25; н.о.– 4,75	13,53 н.о.– 41,99	0,12; 0,01– 0,25	3,04; н.о.– 8,51	9,85; н.о.– 34,46	16,17; н.о.– 48,69
Кадат	10,44; 4,01– 16,87	52,54; 30,05– 75,01	3,01; 0,84– 5,19	26,63; 18,17– 35,09	0,44; 0,02– 0,86	3,18; н.о.– 8,25	9,73; н.о.– 29,69	31,32; н.о.– 85,69
Алчс- дат	10,21; н.о.– 22,47	50,64; 7,38– 93,91	3,35; 0,71– 5,99	7,35; н.о.– 15,98	0,37; н.о.– 0,92	0,61; н.о.– 1,60	1,53; н.о.– 3,40	6,59; н.о.– 39,18
Тым	6,28; 3,66– 8,91	18,12; 8,35– 27,88	1,61; 0,33– 2,88	25,14; 3,45– 46,82	1,05; 0,12– 1,98	н.д.	н.д.	н.д.
Большой Юган	6,35; н.о.– 13,26	16,78; 0,35– 33,21	6,80; н.о.– 15,78	7,28; н.о.– 17,56	1,47; н.о.– 3,03	7,14; н.о.– 18,57	32,82; н.о.– 94,08	125,43; н.о.– 303,23
Сыня	8,56; н.о.– 19,04	12,59; 3,01– 22,16	5,04; н.о.– 23,71	23,74; 2,48– 45,01	1,07; 0,08– 2,05	2,24; н.о.– 3,99	23,27; н.о.– 66,07	104,72; 17,75– 191,68

Примечание: н.о. — ниже предела обнаружения, н.д. — нет данных; Mg — ионы магния, Ca — ионы кальция, Cl — хлориды, SO₄ — сульфаты, Fe — соединения железа общего, Cu — соединения меди, Zn — соединения цинка, Mn — соединения марганца.

Таблица 5

Особенности содержания органических и биогенных веществ в эталонных участках рек Обского бассейна (в ячейках таблицы результаты представлены в виде среднеемноголетнего значения концентраций и диапазона нормальной изменчивости среднегодовых концентраций ($\pm 3\sigma$) растворенного вещества)

Эталонный участок реки	БПК, мг/л	ХПК, мг/л	N(NH ₄), мг/л	N(NO ₃), мг/л	P(PO ₄), мг/л	Phe, мг/л	НФПР, мг/л
	Нормативные концентрации						
	2,0	15	0,39	9	0,05	0,001	0,05
Эталонные участки типа <i>a</i>							
Кокши	1,92; н.о.– 4,58	7,92; 3,95– 11,90	0,10; н.о.– 0,38	0,24; н.о.– 0,50	0,005; н.о.– 0,012	0,001; н.о.– 0,003	0,06; н.о.– 0,24

Продолжение табл. 5

Эталонный участок реки	БПК, мг/л	ХПК, мг/л	N(NH ₄), мг/л	N(NO ₃), мг/л	P(PO ₄), мг/л	Phe, мг/л	НФПР, мг/л
	Нормативные концентрации						
	2,0	15	0,39	9	0,05	0,001	0,05
Большая Терехта	1,24; н.о.– 2,21	7,38; н.о.– 13,87	0,06; н.о.– 0,18	0,33; 0,02– 0,65	0,006; н.о.– 0,012	0,001; н.о.– 0,002	0,12; н.о.– 0,43
Средняя Терсь	1,71; 0,04– 3,37	9,65; 4,30– 15,00	0,16; н.о.– 0,38	0,06; н.о.– 0,17	0,005; н.о.– 0,014	0,001; н.о.– 0,003	0,06; н.о.– 0,17
Вах	0,56; н.о.– 3,69	33,13; 10,69– 55,55	0,30; н.о.– 0,82	0,08; н.о.– 0,25	0,04; 0,01– 0,07	0,0005; н.о.– 0,001	0,039; н.о.– 0,089
Чулышман	0,72; н.о.– 1,12	8,87; 4,39– 13,34	0,08; н.о.– 0,23	0,21; 0,005– 0,411	0,006; н.о.– 0,01	0,001; н.о.– 0,003	0,08; н.о.– 0,24
Катунь	1,02; 0,57– 1,47	6,47; 3,11– 9,84	0,06; н.о.– 0,21	0,32; 0,01– 0,62	0,007; н.о.– 0,01	0,001; н.о.– 0,002	0,11; н.о.– 0,31
Эталонные участки типа б							
Сарала	1,46; 0,62– 2,31	10,38; н.о.– 18,03	0,06; 0,003– 0,118	0,13; н.о.– 0,30	0,007; н.о.– 0,018	0,002; н.о.– 0,003	0,04; н.о.– 0,11
Кадат	2,02; 1,23– 2,82	20,98; 6,59– 35,37	0,1; н.о.– 0,25	0,13; н.о.– 0,39	0,03; н.о.– 0,061	0,0009; н.о.– 0,0025	0,03; н.о.– 0,13
Алчедат	2,24; 0,84– 3,64	16,08; 4,67– 27,49	0,11; н.о.– 0,29	0,81; 0,01– 1,60	0,02; н.о.– 0,04	0,0005; н.о.– 0,0007	0,07; н.о.– 0,17
Тым	1,86; 1,25– 2,46	30,16; 16,29– 44,02	0,86; 0,17– 1,56	0,13; н.о.– 0,29	0,05; 0,01– 0,11	0,001; н.о.– 0,004	0,46; н.о.– 1,06
Большой Юган	1,16; н.о.– 2,73	40,68; 7,02– 74,33	0,44; н.о.– 1,63	0,11; н.о.– 0,27	0,11; н.о.– 0,29	0,0006; н.о.– 0,0016	0,03; н.о.– 0,0668
Сыня	2,11; 0,82– 3,40	25,15; н.о.– 52,91	0,51; н.о.– 1,21	0,05; н.о.– 0,13	0,07; н.о.– 0,17	0,003; н.о.– 0,0058	0,18; н.о.– 0,63

Примечание: н.о. — ниже предела обнаружения, н.д. — нет данных; БПК₅ — легкоокисляемые органические вещества по БПК₅, ХПК — органические вещества по ХПК, N(NH₄) — азот аммонийный, N(NO₃) — азот нитратный, P(PO₄) — фосфор фосфатный, Phe — фенолы летучие, НФПР — нефтепродукты.

полученных результатов следует иметь в виду, что диапазоны изменчивости являются расчетными и реальные среднегодовые концентрации могут пересечь границы $\pm 3\sigma$ с очень низкой вероятностью (менее 0,001 при условии нормального распределения выборки среднегодовых концентраций). Выход за эти пределы говорит о влиянии специальных причин изменчивости. Так как на эталонных участках отсутствует существенное прямое антропогенное влияние на качество воды, следует полагать, что этот диапазон изменчивости соответствует представлениям о собственной изменчивости гидрохимического режима, то есть сформированной под действием разнообразных естественных причин, присутствующих постоянно и неустраняемых.

Сравнение с нормативными концентрациями характерных для эталонных участков рек среднесезонных концентраций показывает, что даже в отсутствие или при минимальной антропогенной нагрузке, качество воды этих участков снижается по естественным причинам за счет:

- соединений железа общего в реках Вах, Тым, Большой Юган и Сыня (значительно превышены нормативы качества воды), в меньшей степени в реках Кадат и Алчедат, а также в реках Средняя Терсь и Сарала;
- соединений меди в реках Вах и Большой Юган, в меньшей степени в реках Кадат, Сарала и Сыня, а также в реке Катушь;
- соединений цинка в реках Вах и Большой Юган и в меньшей степени в реке Сыня, а также в реках Сарала и Кадат;
- соединений марганца в реках Вах, Большой Юган и Сыня, в меньшей степени в реке Кадат, а также в реке Сарала;
- легкоокисляемых органических веществ по БПК₅ в реках Кадат, Алчедат и Сыня;
- органических веществ по ХПК в реках Вах, Тым, Большой Юган, Сыня, Кадат и Алчедат;
- азота аммонийного и фосфора фосфатов в реках Тым, Большой Юган и Сыня;
- фенолов в реках Сарала и Сыня;

– нефтепродуктов в реке Тым (значительно превышены нормативы качества воды), в меньшей степени в реках Большая Терехта, Катунь и Сыня, а также в реках Кокши, Средняя Терсь, Чулышман, Алчедат.

При этом главные ионы и азот нитратный не снижают качество воды эталонных участков рек Обского бассейна.

Обращает на себя внимание, что эталонные участки рек, расположенные в пределах более высокоширотных территорий Западной Сибири (ХМАО, ЯНАО) характеризуются худшим качеством воды. Это проявляется в том, что среднегодовые концентрации азота аммонийного в воде эталонных участков рек Вах, Большой Юган и Сыня в 2–3 раза выше, чем в остальных эталонных участках, но при этом среднегодовые концентрации азота нитратного в 3–5 раз ниже. По-видимому, это связано с тем, что окислительно-восстановительные условия здесь отличаются от остальных эталонных участков в связи с особым режимом растворенного в воде кислорода. В результате снижения его концентраций наблюдается замедление процессов окисления азота аммонийного до нитритов и нитратов, а также эмиссия соединений тяжелых металлов из донных отложений и из комплексов с растворенным органическим веществом. Это подтверждается тем, что концентрации тяжелых металлов в воде эталонных участков рек Вах, Большой Юган и Сыня значительно выше. Снижение концентрации кислорода может быть вызвано не только ограничением его диффузии за счет более продолжительного периода ледостава в северных широтах, но и расходом на окисление поступающих с водосбора органических веществ.

Еще один эталонный участок, гидрохимические особенности которого близки к особенностям рек Вах, Большой Юган и Сыня, — это р. Тым у с. Напас. Здесь также отмечаются большие среднегодовые концентрации соединений железа общего (к сожалению, данные о концентрациях остальных тяжелых металлов отсутствуют, но есть основания предполагать, что они также могут быть существенно повышены), органических

веществ по ХПК, азота аммонийного. Высокие концентрации нефтепродуктов при минимальной антропогенной нагрузке, вероятно, указывают на то, что они могут быть автохтонного происхождения, так как под термином «нефтепродукты» подразумевается чрезвычайно сложная, непостоянная и разнообразная смесь компонентов, основными группами которой являются углеводороды – алифатические, нафтеновые, ароматические, обычно составляющие преобладающую часть нефтепродуктов (от 70 до 90 %), а также окисленные гетероциклические соединения (смолистые компоненты) [7].

Несмотря на то, что среднегодовые концентрации отдельных загрязняющих веществ в воде эталонных участков рек Большой Юган и Тым могут превышать нормативные значения, гидрохимический режим этих участков остается ненарушенным (табл. 6). В воде р. Большой Юган отмечено эпизодическое нарушение стационарности режима сульфатов в 2018 г. Более существенным нарушением является периодическое нарушение стационарности режима соединений железа общего и меди: в период с 2008 по 2013 г. концентрации соединений железа общего были ниже, чем в последующие годы, для соединений меди выделяется период пониженных концентраций с 2012 до 2018 г. В воде эталонного участка р. Тым сформировался убывающий тренд среднегодовых концентраций сульфатов со скоростью около 10,9 мг/л в десятилетие.

Также не нарушен гидрохимический режим эталонных участков рек Кокши, Средняя Терсь и Катунь, хотя по отдельным показателям состава и свойств воды может наблюдаться его нестационарность.

Большая часть остальных эталонных участков характеризуется слабо нарушенным гидрохимическим режимом в основном из-за периодических, иногда эпизодических и редко хронических нарушений стационарности режима отдельных гидрохимических показателей. Это участки рек Чулышман, Большая Терехта, Кадат, Алчедат и Вах. Так в воде р. Вах помимо эпизодического нарушения стационарности гидрохимического

Таблица 6

**Стационарность гидрохимического режима эталонных
участков рек Обского бассейна**

Эталон- ный участок реки	K_{DS}	Нарушен- ность гидро- химического режима	Нарушения стационарности гидрохимического режима			
			Эпизодиче- ское	Периодиче- ское	Хроническое	
					увели- чение	сниже- ние
Кокши	0,18	Ненарушен- ный	НФПР	N(NH ₄)	—	—
Средняя Терсь	0,19	Ненарушен- ный	—	—	—	P(PO ₄)
Большой Юган	0,21	Ненарушен- ный	SO ₄	Fe, Cu	—	—
Тым	0,22	Ненарушен- ный	—	—	—	SO ₄
Катунь	0,23	Ненарушен- ный	N(NH ₄) N(NO ₃)	Cl	—	—
Чулыш- ман	0,27	Слабо нару- шенный	НФПР	Cl, N(NH ₄)	—	—
Большая Терехта	0,27	Слабо нару- шенный	SO ₄ , НФПР	Cl	—	—
Кадат	0,33	Слабо нару- шенный	—	N(NO ₃)	—	Zn, НФПР
Алчедат	0,35	Слабо нару- шенный	—	N(NH ₄)	N(NO ₃)	БПК ₅
Вах	0,35	Слабо нару- шенный	БПК ₅	Cl, НФПР	Fe	—
Сыня	0,54	Умеренно нарушенный	Mg, Cl, N(NH ₄)	БПК ₅ , Fe	—	Zn, НФПР
Сарала	0,66	Нарушен- ный	SO ₄	Mg, Cl, Ca	P(PO ₄)	Zn, Mn, НФПР

Примечание. НФПР — нефтепродукты, N(NH₄) — азот аммонийный, N(NO₃) — азот нитратный, P(PO₄) — фосфор фосфатный, SO₄ — сульфаты, Cl — хлориды, Mg — ионы магния, Ca — ионы кальция, БПК₅ — легкоокисляемые органические вещества по БПК₅, Fe — соединения железа общего, Cu — соединения меди, Zn — соединения цинка, Mn — соединения марганца.

режима легкоокисляемых органических веществ (по БПК₅) в 2016 г. и формирования периодов пониженных концентраций хлоридов с 2008 до 2016 г., а нефтепродуктов — с 2009 по 2015 г., также увеличиваются среднегодовые концентрации соединений железа общего со скоростью около 0,58 мг/л в десятилетие.

Еще один возрастающий тренд сложился для среднегодовых концентраций азота нитратного в воде эталонного участка р. Алчедат (около 0,35 мг/л в десятилетие), но при этом концентрации легкоокисляемых органических веществ (по БПК₅) за истекшие 15 лет постепенно снизились до нормативных значений со скоростью около 0,86 мг/л в десятилетие.

Эталонные участки рек Сыня и Сарала имеют более существенную нарушенность гидрохимического режима. В воде эталонного участка р. Сыня в 2022 г. наблюдались повышенные относительно среднемноголетнего значения концентрации главных ионов (магний и хлориды), а также азота аммонийного. Выделяется период сравнительно пониженных концентраций соединений железа общего с 2011 по 2017 г. и повышенных — легкоокисляемых органических веществ (по БПК₅) с 2008 по 2014 г. Тем не менее хронические нарушения стационарности гидрохимического режима связаны с процессами улучшения качества воды на данном участке. В течение последних 15 лет здесь шло интенсивное снижение среднегодовых концентраций соединений цинка со скоростью около 21,3 мкг/л в десятилетие и нефтепродуктов со скоростью около 0,2 мг/л в десятилетие.

На участке р. Сарала стационарность гидрохимического режима нарушена у главных ионов: наблюдались повышенные концентрации сульфатов в 2009 г., несколько лет (периоды) относительно повышенных среднегодовых концентраций ионов магния, кальция и хлоридов в воде. Только здесь отмечена динамика увеличения среднегодовых концентраций фосфора фосфатного, но с небольшой скоростью (около 0,005 мг/л в де-

сятилетие). Однако присутствуют и несколько тенденций к снижению концентраций загрязняющих веществ — это соединения цинка (скорость около 12,8 мкг/л в десятилетие), марганца (около 13,9 мкг/л в десятилетие) и нефтепродукты (около 0,03 мг/л в десятилетие).

Заключение

Таким образом, оценка особенностей гидрохимического режима эталонных участков рек Обского бассейна показала, что природные факторы могут приводить к снижению качества воды за счет повышенного поступления органических веществ, азота аммонийного и фосфора фосфатного, соединений тяжелых металлов, фенолов и нефтепродуктов. К региональным особенностям можно отнести также тот факт, что главные ионы и азот нитратный для этих участков рек не являются причинами ухудшения качества воды. Эталонные участки рек, расположенные в пределах более высокоширотных территорий Западной Сибири (ХМАО, ЯНАО) имеют худшее качество воды в сравнении с остальными эталонными участками независимо от их типа (*a* или *b*), так как, по-видимому, здесь формируются особые окислительно-восстановительные условия в воде, вызванные периодическим дефицитом кислорода. Повышение концентраций азота аммонийного, соединений металлов и минерального фосфора относительно других эталонных участков может быть связано с их вторичной эмиссией из донных отложений в периоды снижения концентраций растворенного в воде кислорода. Несмотря на превышение среднегодовыми концентрациями некоторых веществ нормативов качества воды, эталонные участки в бассейне р. Обь характеризуются в основном ненарушенным или слабо нарушенным гидрохимическим режимом, за исключением рек Сыня и Сарала. Тем не менее в воде этих участков многолетние тренды среднегодовых концентраций растворенных веществ имеют убывающую направленность, что приводит к постепенному снижению загрязненности воды на данных участках.

Финансирование

Работа выполнена в рамках темы Плана НИТР Росгидромета на 2020–2024 гг., Рег. № НИОКТР: АААА-А20-120032690077-3.

Литература

1. Кондакова М.Ю., Даниленко А.О., Косменко Л.С. Изменчивость степени загрязненности речных вод и состояния водных экосистем в бассейне р. Обь // Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды: приземный климат, загрязняющие и климатически активные вещества : III Всероссийская научная конференция с международным участием. М. : ФГБУ «ИГКЭ», 2023. С. 244–248.
2. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Обь. Кн. 3. Целевые показатели. Утверждена приказом Нижне-Обского БВУ от 25 августа 2014 г. № 285. 72 с.
3. Даниленко А.О., Косменко Л.С., Кондакова М.Ю., Решетняк О.С. Применение диагностических критериев контрольных карт в оценке стационарного состояния водных объектов // Водные ресурсы в условиях глобальных вызовов: экологические проблемы, управление, мониторинг. Новочеркасск : ООО «Лик», 2023. С. 38–43.
4. Беляев С.Д., Михайлова Т.И., Одинцева Г.Я., Чайкина Т.И. Установление приоритетов водоохранной деятельности в бассейне реки на основе целевых показателей качества воды (на примере бассейна реки Оби) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 2. С. 6–25.
5. ГОСТ Р ИСО 16269-4-2017. Статистические методы. Статистическое представление данных. Ч. 4. Выявление и обработка выбросов: дата введения 2018-12-01. М. : Стандартинформ, 2017. 53 с.
6. ГОСТ Р ИСО 7870-2-2015. Статистические методы. Контрольные карты. Ч. 2. Контрольные карты Шухарта: дата введения 2016-12-01. М. : Стандартинформ, 2016. 46 с.
7. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Часть 1 / под ред. Л.В. Боевой. Ростов-на-Дону : Изд-во Южного федерального университета, 2009. 1150 с.

СОДЕРЖАНИЕ РЯДА ПРИОРИТЕТНЫХ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В ПОЧВЕ, РАСТИТЕЛЬНОСТИ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ПРИБАЙКАЛЯ

Б.В. Пастухов¹, С.Г. Парамонов¹, Л.В. Бурцева¹,
Е.С. Конькова¹, А.П. Безделова²

¹ ФГБУ «Институт глобального климата и экологии
имени академика Ю.А. Израэля», Москва

² Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова, Москва

Представлены результаты многолетних наблюдений на станции комплексного фонового мониторинга «Давша» Государственного природного биосферного заповедника «Баргузинский», а также результаты измерения проб, отобранных с 2000 по 2014 г., в период обследований состояния загрязнения природной среды на территориях некоторых ООПТ в регионе озера Байкал. Обследованы долины рек Осиновка (Байкальский заповедник), Давша и Фролиха (Национальный парк Заповедное Подлеморье) и некоторых других. В поверхностных водах, почве и растительности измерялось содержание тяжелых металлов, хлорорганических пестицидов и полиароматических углеводородов.

Ключевые слова: концентрация, химические вещества, окружающая среда

THE CONTENT OF PRIORITY POLLUTANTS IN THE SOIL, VEGETATION AND SURFACE WATERS IN RIVER VALLEYS OF THE NORTHEASTERN BAIKAL REGION

B.V. Pastukhov¹, S.G. Paramonov¹, L.V. Burtseva¹,
E.S. Konkova¹, A.P. Bezdelova²

¹ Institute of Global Climate and Ecology n.a. Acad. Yu.A. Israel, Moscow

² Moscow State University n.a. M.V. Lomonosov, Moscow

The article presents the results of long-term observations at the Davsha integrated background monitoring station of the Barguzinsky Nature

Biosphere Reserve, as well as the results of measuring samples taken from 2000 to 2014 during the period of surveys of the state of environmental pollution in some special protected natural areas of the Lake Baikal region. The valleys of the Osinovka river (Baikalsky Nature Reserve), Davsha and Frolikha rivers (Zapovednoye Podlemorye National Park) and some other rivers were surveyed. The content of heavy metals, organochlorine pesticides and polyaromatic hydrocarbons was measured in surface waters, soil and vegetation.

Keywords: concentration, chemicals, environment

Введение

Озеро Байкал является общепризнанным уникальным экологическим объектом. Чистота вод озера и состояние различных элементов его экосистемы получили всемирное признание. С 1996 г. озеро и примыкающие к нему природные объекты были включены в Список участков всемирного природного наследия ЮНЕСКО, а в 1999 г. был принят закон Российской Федерации «Об охране озера Байкал».

Изучению состояния загрязнения окружающей среды в регионе озера Байкал в конце прошлого столетия были посвящены многие исследования и публикации [1, 2].

В ФГБУ «ИГКЭ» (тогда ещё в составе ИПГ, а позднее ЛАМ) работы по исследованию состояния озера Байкал начались с конца 1970-х гг. с участия совместных судовых экспедиций в летний период и комплексных вертолетных снегомерных исследований в зимнее время и продолжались в последующие годы [3, 4].

С целью комплексной оценки состояния природной среды в регионе озера Байкал и изучения динамики его возможного изменения в 1982 г. в районе поселка Давша на территории Государственного природного биосферного заповедника «Баргузинский» (Баргузинский БЗ), была организована станция комплексного фонового мониторинга (КФМ).

Станция была открыта в рамках разработанной в конце 70-х гг. прошлого столетия академиком Ю.А. Израэлем [5]

концепции комплексного фоновый мониторинга как подсистемы общегосударственной системы наблюдений и контроля (ОГСНК).

Основными задачами фоновый мониторинга, в отличие от других систем наблюдений, создававшихся ранее, являлась комплексность проведения исследований, включающая получение длительных рядов наблюдений за состоянием загрязнения всех основных компонентов природной среды. Это атмосферный воздух, почва, растительность, поверхностные воды и атмосферные осадки. В качестве площадок для таких наблюдений были выбраны особо охраняемые природные территории (ООПТ), на которых собственная антропогенная деятельность как в настоящем, так и в будущем должна была быть минимальной, а сами территории ООПТ удалены от значительных источников загрязнения на большие расстояния.

Наблюдения на станции КФМ «Давша», также как и на других станциях КФМ, проводились по типовой программе с использованием унифицированных методик [6, 7] непрерывно до 1998 г., когда станция прекратила свою работу. Причиной закрытия послужили прекращение энергоснабжения поселка Давша и самой станции КФМ, которое осуществлялось от дизельной электростанции, и вынужденное переселение всех жителей в более доступные для организации проживания районы.

Основные результаты, полученные за время работы станции КФМ и во время последующих обследований до 2003 г., публиковались в ежегодных «Обзорах фоновый состояния окружающей природной среды в СССР» и обобщены в работах [8–10].

После закрытия станции КФМ «Давша» предпринимались многочисленные попытки выбора места для организации новой станции на территориях ООПТ, расположенных в различных районах Прибайкалья. Основным условием для выбора места было наличие стационарного энергоснабжения и отсутствие значительных антропогенных источников, способных

оказывать негативное влияние на результаты наблюдений. Обследовались территории Байкальского БЗ в районе реки Осиновка, Национального парка «Заповедное Подлеморье», включая долины рек Давша и Фролиха и некоторые районы южно-го Прибайкалья. При этом отбирались пробы почвы, растительности и поверхностных вод с целью изучения пространственного распределения изучаемых химических веществ вдоль склонов долин рек от устьев до водораздельных хребтов.

Места отбора проб в разные годы в акватории озера Байкал показаны на рис. 1.

Ниже представлены результаты измерений концентраций ряда приоритетных тяжелых металлов, хлорорганических

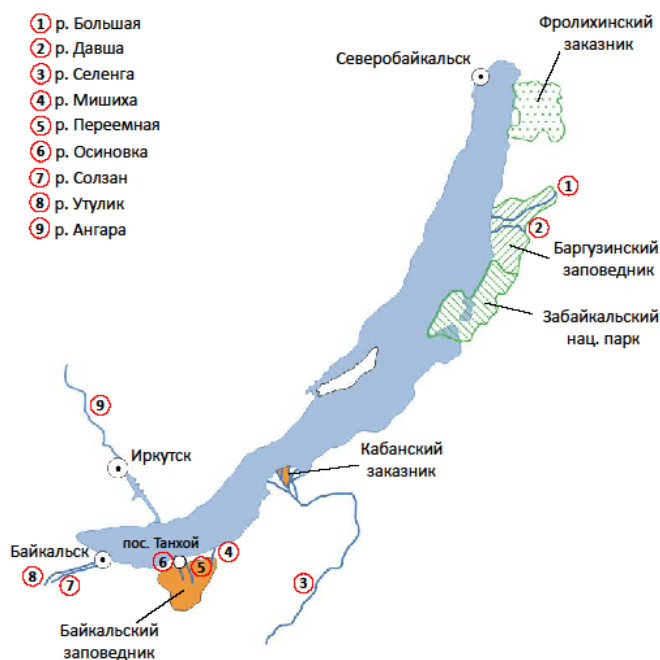


Рис. 1. Схема озера Байкал и водных объектов, упоминаемых в тексте: 1 — р. Большая; 2 — р. Давша; 3 — р. Селенга; 4 — р. Мишиха; 5 — р. Осиновка; 6 — р. Переемная; 7 — р. Солзан; 8 — р. Утулик; 9 — р. Ангара

пестицидов (ХОП) и полиароматических углеводородов (ПАУ) в поверхностных водах, почве и растительности, как в период регулярных наблюдений на станции КФМ «Давша» (1983–1998 гг.), так и полученные в периоды последующих обследований, выполнявшихся сотрудниками Баргузинского БЗ и специалистами ФГБУ «ИГКЭ».

Методы исследования

Регулярные наблюдения на станции КФМ, также как и все последующие исследования, выполнялись в соответствии с методиками, разработанными для сети станций КФМ и изложенными в [6]. Измерения всех проб до 1987 г. выполнялись в химической лаборатории Иркутского УГМС, а позднее в аналитической лаборатории КФМ ЛАМ, преобразованной в начале 2000-х гг. в ФГБУ «ИГКЭ».

Отбор проб поверхностных вод в период всех наблюдений осуществлялся из поверхностного слоя водотоков в соответствии с рекомендациями для сети станций КФМ [6]. В пробах измерялись концентрации тяжелых металлов (свинец, кадмий, позднее ртуть, медь и цинк), хлорорганических пестицидов (ДДТ и ГХЦГ), а также полиароматических углеводородов — 3,4-бензпирена (3,4-БП) и 1,12-бензперилена (1,12-БПЛ). Консервация отбираемых проб осуществлялась сразу после отбора. Измерения проб выполнялись в течение 1 месяца после отбора.

Наблюдения за содержанием химических веществ в почвах на территории Баргузинского БЗ по программе работы станции КФМ выполнялись с 1983 по 1998 г. Отборы проб производились из двух почвенных горизонтов: 0–5 и 5–15 см на различных высотных поясах (в 6 точках на высотах от 460 до 1400 м над уровнем моря) вдоль долины р. Давша. Подробные результаты измерений изложены в работах [8, 9]. После закрытия станции отборы проб почвы в 2003 г. на тех же высот-

ных поясах выполнялись сотрудниками Баргузинского БЗ, а в 2013 г. сотрудниками ФГБУ «ИГКЭ».

Краткая характеристика мест отбора проб

Вдоль долины р. Давша отборы проб почвы, растительности и поверхностных вод (при их наличии) выполнялись на стационарных площадках заповедника. Растительность отбиралась по видам, характерным для данного пояса и наиболее широко представленным в данном районе.

Точка № 1 — Березово-кедрово-лиственничный лес с елью и сосной и бруснично-зеленомошной растительностью в 200 м от оз. Байкал, 460 м над уровнем моря.

Точка № 2 — луговая часть долины реки Давша, предгорье, смешанный светлохвойный лес в 12,5 км от оз. Байкала, 518 м над уровнем моря.

Точка № 3 — средняя часть горно-лесного пояса, осинник с пихтово-кедровым подростом в 18,9 км от оз. Байкал, 720 м над уровнем моря.

Точка № 4 — долина реки Давша, верхняя часть горно-лесного пояса, пихтарник черничный в 23,5 км от оз. Байкал, 1280 м над уровнем моря.

Точка № 5 — верхняя граница леса, субальпийский пояс, парковый березняк в 27,4 км от оз. Байкал, 1400 м над уровнем моря.

Точка № 6 — верховья р. Давша, альпийский пояс, чернично-бадановая пустошь, в 29,5 км от оз. Байкал, 1460 м над уровнем моря.

Более подробное описание почв и растительности в точках отбора изложено в работе [11].

Территория Фролихинского заказника Баргузинского БЗ, который в 2012 г. вошел в состав национального парка «Заповедное Подлеморье», обследовалась в 2014 г. Краткая характеристика пунктов отбора проб представлена в табл. 1, а характеристики лесных сообществ в местах отбора проб даны ниже.

Точка 1 — березово-сосново-кедрово-стланиковый лес с баданом толстолистным, грушункой, майником двулистным, седмичником европейским и багульником болотным. В лесу сплошной моховой покров с преобладанием плевроциум Шребера (*Pleurozium schreberi* L.).

Точка 2 — в 200 м на северо-восток от зимовья. Кедрово-сосново-лиственничный с березой, осинкой и стлаником лес. Моховой покров с преобладанием плевроциум Шребера. В травяном ярусе преобладают багульник, брусника и линнея северная.

Таблица 1

**Места отбора проб на территории Фролихинского заказника
и в озере Байкал в августе 2014 г.**

№ точки	Дата отбора	Высота над уровнем моря, м	Место отбора проб	Виды проб
1	02.08.14	689	Приозерный вал в устье р. Правая Фролиха (20 м от берега)	Почва, растительность, вода в устье р. Правая Фролиха
2	03.08.14	587	200 м к с-в от зимовья	Почва, растительность
3	04.08.14	1200	Вершина горы Медвежья (с-в склон)	Почва, растительность
4	04.08.14	528	оз. Фролиха (напротив базы)	Поверхностные воды
5	06.08.14	467	Приозерный вал оз. Байкал (400 м от берега бухты Ая)	Почва, растительность
6	06.08.14	455	оз. Байкал (100 м от берега в бухте Ая)	Поверхностные воды
7	07.08.14	455	оз. Байкал (середина озера напротив бухты Ая)	Поверхностные воды

Точка 3 — вершина горы Медвежья. Склон с-в экспозиции с уклоном 8° – 10° , переходящий в крупно-каменистый осыпной. Растительность представлена кедрово-стланиковым кашкарово-шикшево-чернично-ягельным сообществом.

Точка 5 — кедрово-сосново-лиственничное, кедрово-стланиковое, шикшево-зеленомошно-ягельное редколесье. В подросте преобладает кедр. В напочвенном покрове преобладает ягель, зеленый мох, брусника, багульник болотный, шикша.

В точках 4, 6 и 7 отбирались только пробы поверхностных вод.

На территории Байкальского БЗ в 2012 г. отборы проб почвы, растительности и поверхностных вод проводились вдоль долины р. Осиновка.

Точка 1 — вершина мелкокаменистого водораздельного хребта левого берега реки с ю-з экспозицией, 1511 м над уровнем моря. Подгольцовый субальпийский пояс с кедровым стлаником, баданом толстолистным и рододендром золотистым.

Точка 2 — подгольцово-субальпийский пояс 1276 м над уровнем моря, седловина бокового хребта левого склона долины реки. Злаково-разнотравно-папоротниковый субальпийский луг с пихтовыми парками, березой и единичным кедром.

Точка 3 — верхняя пойма правого берега реки, 956 м над уровнем моря. Пихтовое редколесье на верхней границе таежного пояса. Отбирались пробы почвы.

Точка 4 — верхняя пойма правого берега реки, 897 м над уровнем моря. Кедрово-пихтовый с березой лес с баданово-чернично-папоротниково-вейниково-зеленомошной растительностью.

Точка 5 — таежный пояс правого берега реки. Разнотравно-папоротниковый субальпийский луг с единичным древостоем.

Точка 6 — водопад, 602 м над уровнем моря. Березово-кедрово-пихтовый лес с баданово-чернично-зеленомошной растительностью.

Точка 7 — район ЛЭП, 536 м над уровнем моря. Березово-пихтово-кедровый лес с осоково-чернично-зеленомошной растительностью. Верховое болото.

Краткая характеристика мест отбора проб на территории Южного Прибайкалья приведена ниже в табл. 5 и 13.

Ниже рассмотрены результаты измерения содержания изучаемых химических веществ как в период регулярных многолетних наблюдений, проводившихся на станции КФМ, так и в период последующих исследований.

Поверхностные воды

В озеро Байкал впадает более 330 рек и ручьев, которые берут свое начало на склонах окружающих озеро горных хребтов. Питание рек осуществляется в основном за счет таяния зимних снежников и выпадения атмосферных осадков. Для большинства рек характерно отсутствие проявления антропогенных воздействий, а химический состав вод формируется за счет выпадающих в течение года атмосферных осадков и особенностей подстилающих горных пород, в составе которых в отдельных районах имеются полиметаллические руды.

К числу рек, способных оказывать негативное воздействие на качество поверхностных вод в озере Байкал, можно отнести реки, впадающие в Байкал в его северной и южной частях, а также реку Селенга, впадающую на востоке.

В табл. 2–4 представлены результаты анализов проб, отобранных в устьях рек Большая и Давша в период регулярных наблюдений на станции КФМ Баргузинского БЗ (1982–1998 гг.), и проб, отобранных сотрудниками Баргузинского БЗ в 2003–2008 гг., а также исследований, проводившихся сотрудниками ФГБУ «ИГКЭ» в 2013 г.

Данные, приведенные в табл. 2, показывают, что концентрации всех химических веществ в устьях рек Большая и Давша на территории Баргузинского БЗ существенно ниже значений ПДК о.х. и ПДК р.х. Исключение составляют только свинец, цинк и ДДТ, средняя концентрация которых в воде не-

сколько выше ПДК р.х. Анализ временной динамики концентраций показывает, что в целом она неоднородна.

В многолетней динамике некоторое повышение содержания тяжелых металлов и $\Sigma\text{ДДТ}$ в воде отмечается к началу 1990-х гг. с последующим снижением.

Для сравнения в табл. 3 представлены данные измерений содержания тех же веществ в прибрежной зоне акватории озера Байкал, полученные в 2004–2014 гг.

Сравнение результатов в табл. 1 и 2 показывает, что средние значения концентрации рассматриваемых химических веществ в устьях рек Большая и Давша по данным наблюдений 1982–2013 гг. несколько выше, чем в прибрежной акватории озера Байкал по данным 2004–2014 гг.

Результаты изучения распределения концентраций изучаемых химических веществ в реке Давша от истока до устья, полученные в период обследования в августе 2013 г., представлены в табл. 4.

Результаты показывают, что характер изменения концентраций химических веществ в поверхностных водах вдоль реки Давша для различных веществ отличается. Концентрации ртути в воде имеют наибольшее значение у истока реки, берущей свое начало в глубине склона и уменьшаются к устью. Для остальных веществ наибольшие значения концентрации наблюдались в среднем течении реки или в устье.

В период 2011–2012 гг. было проведено обследование рек, впадающих в озеро Байкал в его южной и юго-восточной части, включая территорию Байкальского БЗ и входящего в его состав Кабанского заказника, расположенного в дельте реки Селенга.

Результаты измерения проб, отобранных в 2011 г., представлены в табл. 5. Отборы проб производились выше мест, где могло проявляться антропогенное влияние со стороны расположенных на берегу Байкала населенных пунктов.

Сравнение результатов измерений изучаемых веществ в реках южного Прибайкалья с результатами, полученными в

2013 г. на реке Давша, показывает, что концентрации всех металлов в поверхностной воде на территории южного Прибайкалья несколько выше.

В сентябре 2012 г. было проведено обследование территории Байкальского БЗ с отборами проб поверхностных вод вдоль долины реки Осиновка. На тех же высотных поясах отбирались пробы почвы и растительности. Результаты измерений химических веществ в поверхностных водах рек Осиновка и Селенга (Кабанский заказник заповедника) приведены в табл. 6.

Результаты показали, что в поверхностных водах южной части дельты р. Селенга заметное превышение концентраций отмечалось только по ртути и свинцу. По остальным веществам концентрации в р. Селенга были соизмеримыми или даже ниже, чем в р. Осиновка.

В августе 2014 г. было проведено обследование территории Фролихинского заказника в северо-восточной части Прибайкалья на территории Национального парка «Заповедное Подлеморье». Результаты измерений представлены в табл. 7.

Результаты показали, что концентрации всех измеряемых химических веществ в поверхностных водах на территории Фролихинского заказника также очень низкие и соизмеримые с их содержанием в воде северной части озера Байкал.

В табл. 8 представлены обобщенные данные по содержанию исследуемых химических веществ в устьевых створах исследованных водотоков в различных частях озера Байкал. Они показывают, что концентрации изучаемых химических веществ во всех водных объектах близкие и имеют низкие фоновые значения.

Почва

Почва в целом является консервативной природной средой, и содержание различных химических веществ в ней в значительной степени определяется ее естественным химическим составом и дополнительными поступлениями за счет выпадения

ния атмосферных осадков и сухих аэрозолей. В урбанизированных районах на химический состав почвы в значительной степени могут оказывать влияние атмосферные переносы загрязняющих веществ. В фоновых районах такое влияние не существенно, а различия могут объясняться лишь неоднородностью почвы.

Все исходные результаты наблюдений в 1983–1993 гг. за содержанием химических веществ в почвах в долине реки Давша на территории Баргузинского БЗ описаны в работе [8]. В табл. 9 представлены осредненные результаты измерений по высотным горизонтам долины реки Давша в период наблюдений на станции КФМ.

Анализ данных, представленных в работе [8], показывает, что в целом распределение концентраций рассматриваемых химических веществ по высотным поясам было неоднородно, а значения концентраций низкими и не превышающими нормативы ПДК.

Межгодовая изменчивость концентраций для большинства исследуемых химических веществ на каждом из шести высотных поясов незначительна. Наиболее существенные повышения концентраций по содержанию свинца (до 28 нг/г) во всех пробах наблюдались в 1984 и 1985 г. после значительных лесных пожаров, а также по содержанию ДДТ (до 91 нг/г) и γ -ГХЦГ (до 14 нг/г) в период с 1983 по 1985 г., что может быть связано с их применением в качестве инсектицидов при борьбе с насекомыми. В последующие годы содержание пестицидов и свинца в почве было существенно ниже. В августе 2013 г. сотрудниками ФГБУ «ИГКЭ» были проведены повторные отборы проб почвы на тех же контрольных высотных площадках заповедника. На каждой площадке отборы проб осуществлялись в пяти точках (методом конверта) на горизонтах 0–5, 5–10 и 10–20 см. Результаты измерений представлены в табл. 10.

Сравнение данных, представленных в табл. 9 и 10, показывает, что они близки и расхождения в величинах concentra-

ции не являются существенными. За прошедший период в почве в долине реки Давша произошло снижение содержания свинца и некоторое увеличение концентрации $\Sigma\text{ДДТ}$.

Концентрации изучаемых химических веществ в почве на территории Фролихинского заказника национального парка «Заповедное Подлеморье» (2014 г.) представлены в табл. 11, в Байкальском БЗ вдоль долины реки Осиновка (2012 г.) — в табл. 12, а в долинах рек Солзан и Утулик (2011 г.) выше мест возможного влияния населенных пунктов — в табл. 13.

Полученные данные показывают, что по склонам вдоль долин рек Давша, Сосновка и на Фролихинском участке значения концентраций для всех рассматриваемых химических веществ имеют близкие значения. Существенных различий по величине концентрации по высотным поясам не обнаружено. По почвенным горизонтам в каждом пункте наблюдения также определенная закономерность отсутствует. Для $\Sigma\text{ДДТ}$ на открытых участках склонов характерно наличие более высоких значений концентрации в верхнем гумусовом слое почвы и снижение концентрации вглубь почвенного горизонта. Обобщенные результаты измерения содержания химических веществ в различных районах Прибайкалья в почвенных горизонтах до 20 см представлены в табл. 14 и показывают, что во всех пунктах наблюдения величины концентраций имеют близкие значения.

Растительность

Все виды растительности условно можно разделить на 3 группы: многолетние нелистопадные с сохраняемым зеленым растительным покровом в холодный период года (хвойные), многолетние листопадные (большая часть деревьев и кустарников) и травянистая с ежегодно возобновляемой надземной частью и вырастающей из семян или из сохранившейся в течение зимы корневой системы.

Поступление химических веществ в зеленые растительные ткани в основном происходит либо из почвы через корневую

систему с глубины ее залегания, либо за счет поглощения листовым аппаратом из атмосферного воздуха или атмосферных осадков.

В зависимости от этого содержание различных химических веществ в растительности может либо накапливаться, либо возобновляться под влиянием меняющихся условий окружающей среды.

В период проведения наблюдений на станции КФМ в Баргузинском БЗ отборы проб растительности, вдоль долины реки Давша выполнялись на высотных поясах от 460 до 1395 м над уровнем моря [8]. Отбирались пробы подстилающей травяной растительности (разнотравье), хвои кедра, мхов и листьев березы. Обобщенные результаты измерения за период с 1988 по 1991 г. представлены в табл. 15.

В 2013 г. в долине реки Давша были проведены повторные отборы проб растительности на 6 высотных поясах в интервале от 460 до 1395 м над уровнем моря. Отбирались пробы хвои кедра, листья березы, годовой прирост мха и лист бадана, как вид, наиболее широко представленный по всей долине реки Давша. Результаты измерений представлены в табл. 16.

В 2014 г. при обследовании северо-восточной части Прибайкалья были отобраны пробы растительности на территории Фролихинского заказника национального парка «Заповедное Подлеморье». Отбирались пробы хвои кедра, мха, листьев березы, брусники и бадана в диапазоне высот от 457 до 1200 м над уровнем моря. Результаты представлены в табл. 17. В табл. 18 приведены результаты измерений этих же веществ в растительности по вертикальному профилю вдоль долины р. Осиновка на территории Байкальского БЗ в интервале высот от 436 до 1510 м над уровнем моря.

Для сравнения с чистыми фоновыми территориями восточной части Прибайкалья, в табл. 19 представлены результаты измерения проб, отобранных в предгорьях южной части Прибайкалья выше зон возможных антропогенных влияний — прибрежных населенных пунктов.

**Концентрации химических веществ в поверхностных водах в устьях рек Давша и Большая (*)
на территории Баргузинского БЗ в период с 1982 по 2013 г.**

Год, река	Концентрация, мкг/л					Концентрация, нг/л				
	Hg	Pb	Cd	Cu	Zn	γ-ГХЦГ	α-ГХЦГ	ΣДДТ	3,4-БП	1,12-БПЛ
1982 (*)	0,05	1,0	0,100	–	–	–	–	–	–	–
1983 (*)	0,05	0,28	0,070	–	–	–	–	6,0	–	–
1984 (*)	0,06	0,6	0,06	–	–	25	–	12	–	–
1985	–	1,2	0,46	–	–	–	–	–	–	–
1986	0,10	1,0	0,410	–	–	–	–	–	–	–
1987	–	1,1	0,150	–	–	3,00	5,00	37,0	–	–
1988	0,17	1,8	–	–	–	2,40	3,48	79	–	–
1989	0,16	3,5	0,389	–	–	2,38	1,21	15,8	–	–
1990	1,53	1,8	0,296	10,6	43,5	0,45	0,48	26,2	–	–
1991	1,46	2,8	0,160	5,03	16,9	0,76	0,96	17,4	–	–
1992	–	2,7	0,084	1,81	27,3	35,69	1,57	22,2	–	–
1993	0,09	1,9	0,010	13,9	7,36	1,98	3,35	20,4	–	–
1994	0,68	2,1	0,056	0,69	9,45	–	–	–	–	–
1995	1,40	0,8	0,053	–	–	–	–	–	0,05	–
1996	–	2,81	0,177	–	–	–	–	–	0,26	–
1997	2,17	0,25	0,125	–	–	–	–	–	0,40	–
2003	–	0,38	0,03	–	–	2,42	1,85	4,73	0,4	1,0

Продолжение табл. 2

Год, река	Концентрация, мкг/л					Концентрация, нг/л				
	Hg	Pb	Cd	Cu	Zn	γ-ГХЦГ	α-ГХЦГ	ΣДДТ	3,4-БП	1,12-БПЛ
2003 (*)	0,06	0,34	0,096	–	–	2,77	1,54	17,7	0,4	0,8
2004	0,39	0,41	0,034	–	–	1,9	2,0	0,7	0,6	1,2
2004 (*)	1,07	0,50	0,046	–	–	1,8	1,5	2,0	0,6	0,8
2005	0,26	0,74	0,07	0,33	21	0,7	0,8	0,75	0,8	0,7
2005 (*)	0,78	1,3	0,3	1,0	41	1,0	1,1	0,75	0,6	0,8
2006	–	1,01	0,06	0,88	45,0	0,5	0,5	37,5	1,0	1,4
2007	0,34	2,2	0,18	1,9	46,0	2,3	3,0	69,2	0,4	0,8
2008	0,27	1,00	0,048	0,74	35,0	–	–	–	–	–
Ср. 1982-2008	0,58	1,33	0,138	3,68	29,3	5,3	1,90	21,0	0,6	0,94
2013	0,03	0,23	0,036	0,65	–	4,2	–	307	1,64	–
Диапазон	0,05–2,17	0,23–3,5	0,01–0,46	0,33–13,9	7,36–46	0,5–4,2	0,5–3,0	0,75–69	0,05–1,0	0,7–1,4
Среднее	0,55	1,30	0,144	3,41	29,3	5,6	1,92	37,0	0,59	0,93
ПДК р.х.	0,01	6	5,0	1,0	10	10	10	10	–	–
ПДК о.х.	1,0	10	1,0	100	1000	4000	20000	100000	5	–

Обобщенные результаты измерений содержания химических веществ в поверхностных водах озера Байкал в бухтах рек Давша, Большая и Шумилиха на территории Баргузинского БЗ (в числителе диапазон, в знаменателе средняя концентрация)

Год	Концентрация, мкг/л					Концентрация, нг/л				
	Hg	Pb	Cd	Cu	Zn	γ-ГХЦГ	α-ГХЦГ	ΣДДТ	3,4-БП	1,12-БПЛ
2004	–	0,4-0,5/ 0,46	0,03-0,05/ 0,038	–	–	0,8-1,9/ 1,5	0,8-2,0/ 1,43	менее 0,5	0,6	0,8-1,2/ 0,9
2006	0,3-2,6/ 0,8	0,4-4,4/ 2,1	0,05-0,18/ 0,09	0,9- 7,8/-3,3	9,0-45/ 22,2	0,1-1,6/ 0,35	0,1-9,8/ 1,72	0,2-124/ 50	0,3-1,0/ 0,63	0,9-1,8/ 1,42
2007	0,14-0,64/ 0,3	1,3-6,5/ 2,6	0,02-0,3/ 0,13	0,8-3,4/ 2,3	12-50/ 28	0,2-2,3/ 1,2	0,2-3/ 1,3	0,2-65/ 25	0,3-0,7/ 0,5	0,6-0,8/ 0,7
2013	0,01-0,03/ 0,013	0,3-1,3/ 0,71	0,04-0,12/ 0,063	0,6-3,9/ 1,56	–	3,6-5,5/ 4,8	менее 1,0	149-318/ 238	0,82-1,6/ 1,09	1,4-2,80/ 2,33
2014*	0,04-0,12/ 0,08	0,45-0,8/ 0,62	0,23	1,9-2,3/ 2,1	–	40-86,6/ 63	менее 1,0	3-23,5/ 13,2	0,38	0,61
1982- 2013**	0,55	1,30	0,144	3,41	29,3	5,6	1,92	37,0	0,59	0,93

Примечание. * Результаты измерения в северной части оз. Байкал (губа Аяя). ** Средняя концентрация в устьях рек Большая и Давша.

Таблица 4

**Распределение концентраций изучаемых химических веществ в поверхностных водах
по долине реки Давша на территории Баргузинского БЗ в августе 2013 г.**

Места отбора проб, высота над уровнем моря	Концентрация, мкг/л				Концентрация, нг/л		
	Hg	Pb	Cd	Cu	γ-ГХЦГ	ΣДДТ	3,4-БП
р. Давша (исток), 1390 м	0,022	0,12	0,021	0,57	4,5	198	0,82
р. Давша (плато), 518 м	0,012	0,98	0,028	2,1	5,9	568	0,59
р. Давша (устье), 460 м	0,003	0,23	0,036	0,65	4,2	307	1,64
Среднее	0,012	0,44	0,028	1,11	4,9	358	1,02

Таблица 5

**Концентрация изучаемых химических веществ в поверхностных водах оз. Байкал и рек,
впадающих в него в его южной части в период 7–12 сентября 2011 г.**

Место отбора, высота над уровнем моря	Концентрация, мкг/л				Концентрация, нг/л		
	Hg	Pb	Cd	Cu	γ-ГХЦГ	ΣДДТ	3,4-БП
р. Утулик (1 км выше устья), 468 м	0,01	0,65	0,14	1,5	55	119	0,56
р. Солзан (1 км выше г. Байкальск), 469 м	0,01	0,43	0,09	1,6	17	218	нпо
р. Переемная (устье), 453 м	0,02	1,9	0,65	1,0	28	262	0,36
р. Мишиха (устье), 453 м	0,02	13	3,2	1,1	—	—	—
Среднее	0,08	4,9	0,57	2,2	24	81	0,32
оз. Байкал (южная часть, 500 м от берега)	0,05	0,74	0,45	0,76	56	10	0,5

Примечание. Здесь и в следующих таблицах нпо — значение ниже предела обнаружения.

Таблица 6

**Концентрация изучаемых химических веществ в поверхностных водах рек Осиновка
и дельте Селенги (Кабанский заказник) на территории Байкальского БЗ**

Место отбора, высота над уровнем моря	Дата отбора (месяц, год)	Концентрация, мкг/л				Концентрация, нг/л			
		Hg	Pb	Cd	Cu	γ-ГХЦГ	ΣДДТ	3,4-БП	1,12-БПЛ
р. Осиновка (исток), 1270 м	09.2012	0,09	7,7	0,28	1,5	0,5	8,2	0,48	0,5
р. Осиновка (среднее течение), 855 м	09.2012	0,05	5,6	0,25	3,2	0,5	17,5	0,12	0,24
р. Осиновка (мост), 516 м	09.2011	0,02	4,9	3,1	2,0	16	201	0,5	0,5
р. Осиновка (мост), 516 м	09.2012	0,03	9,1	0,16	0,7	0,5	5,4	0,5	0,5
Среднее по реке	2011–2012	0,048	6,8	0,94	1,9	4,4	58,0	0,4	0,4
р. Селенга, 453 м	09.2012	0,51	7,2	0,10	2,1	0,4	0,5	0,12	0,48

Таблица 7

Концентрации изучаемых химических веществ в поверхностных водах реки Фролихи на территории Фролихинского заказника Национального парка «Заповедное Подлеморье» в период 2–7 августа 2014 г.

Характеристика мест отбора проб, высота над уровнем моря	Концентрация, мкг/л				Концентрация, нг/л		
	Hg	Pb	Cd	Cu	γ-ГХЦГ	ΣДДТ	3,4-БП
Озеро Фролиха, 528 м	0,06	0,59	0,46	1,7	20	13	0,54
р. Левая Фролиха (устье), 528 м	0,09	0,67	0,21	2,2	36	16	0,38
р. Правая Фролиха (устье), 528 м	0,19	0,54	0,34	1,7	11	144	0,36
Среднее по рекам и озеру	0,11	0,60	0,34	1,9	22	61	0,43
оз. Байкал (губа Аяя, 100 м от берега)	0,04	0,8	0,23	1,9	87	3,2	0,38
оз. Байкал (середина озера)	0,12	0,45	0,23	2,3	40	23,5	0,38

**Средние значения концентрации химических веществ в поверхностных водах устьев рек
различных районов Прибайкалья и в оз. Байкал**

Водный объект	Дата измерения	Концентрация, мкг/л				Концентрация, нг/л		
		Hg	Pb	Cd	Cu	γ-ГХЦГ	Σ ДДТ	3,4-БП
Озеро и реки Левая и Правая Фролиха	08.2014	0,11	0,60	0,34	1,9	22	61	0,43
р. Давша (устье)	1982–2008	0,55	1,30	0,144	3,41	5,3	21,0	0,6
р. Давша (устье)	08.2013	0,003	0,23	0,036	0,65	4,2	307	1,64
р. Осиновка (устье)	09.2012	0,03	9,1	0,16	0,72	0,5	5,4	0,5
Реки южного Прибайкалья	09.2011	0,08	4,9	0,57	2,2	24	81	0,32
оз. Байкал (северная часть)	08.2014	0,08	0,62	0,23	2,1	63	13,4	0,38
оз. Байкал (у пос. Танхой)	04.09.2012	0,04	2,7	0,34	4,1	0,4	12	0,24
оз. Байкал (южная часть)	09.2011	0,05	0,74	0,45	0,76	56	10	0,5

Таблица 9

Средние концентрации химических веществ в слое почвы 0-15 см в долине реки Давша на территории Баргузинского БЗ (по данным станции КФМ в 1983–1993 гг.)

Место отбора проб, высота	Число измерений	Концентрация, мкг/г				Концентрация, нг/г	
		Hg	Pb	Cd	γ-ГХЦГ	Σ ДДТ	Σ ДДТ
		30	30	30	41	30	30
Долина р. Давша, 460–1400 м над уровнем моря	Общее						
	Диапазон	0,007–0,40	1,7–28,2	0,08–0,45	0,05–9,5	0,28–91	
	Среднее	0,07	8,1	0,25	1,6	1,9	

Таблица 10

Концентрации исследуемых химических веществ в почве вдоль долины реки Давша на территории Баргузинского БЗ в августе 2013 г.

№ точки	Высота над уровнем моря, удаленность от берега	Почвенный горизонт, см	Концентрация, мкг/г				Концентрация, нг/г		
			Pb	Cd	Cu	γ-ГХЦГ	Σ ДДТ	3,4-БП	
1	460 м (200 м от оз. Байкал)	0–3 (Ао)	2,6	0,26	4,3	2,3	6,8	0,74	
		3–10 (А1–А2)	2,4	0,44	5,7	4,6	6,0	0,49	
2	518 м (12,5 км от оз. Байкал)	0–5 (Ао)	4,6	0,26	3,1	2,0	25	0,6	
		5–10 (А1)	6,9	0,08	9,9	0,9	2,5	1,6	
		10–20 (А1-Б)	4,4	0,10	3,9	0,3	13,5	1,0	

№ точки	Высота над уровнем моря, удаленность от берега	Почвенный горизонт, см	Концентрация, мкг/г			Концентрация, нг/г		
			Pb	Cd	Cu	γ-ГХЦГ	Σ ДДГ	3,4-БП
3	720 м (18,9 км от оз. Байкал)	0-4 (A0)	5,8	2,8	5,0	0,35	0,5	0,3
		4-15 (A1)	8,2	0,48	3,7	0,6	4,5	0,44
		20-30 (A1-A2)	5,5	2,2	4,4	1,6	4,8	0,44
4	1280 м (25,5 км от оз. Байкал)	0-2 (A0)	5,4	0,12	6,8	1,4	3,2	0,42
		2-10 (A1)	4,0	0,04	8,6	1,8	6,5	0,63
		10-20 (A2)	5,1	0,06	5,1	1,6	5,5	0,42
5	1395 м (27,4 км от оз. Байкал)	0-3 (A1)	5,0	0,08	3,2	1,7	4,4	0,63
		3-10 (A1-Б)	3,6	0,06	4,1	0,8	3,3	0,42
		10-15 (Б)	3,8	0,05	3,9	1,9	4,7	0,42
6	1640 м (29,5 км от оз. Байкал)	0-3 (A1)	5,2	0,43	7,1	2,4	3,4	0,74
		3-10 (A1-Б)	5,2	0,12	12	2,6	7,7	0,49
		10-15 (Б)	4,8	0,6	4,7	1,5	2,7	0,74
Среднее		0-3 (A0)	4,7	0,66	4,92	1,69	8,22	0,57
		3-10 (A1)	5,1	0,20	7,33	1,88	5,08	0,68
		10-20 (A1-Б)	4,7	0,60	4,40	1,38	6,24	0,60
Среднее за 1983-1993 гг.			8,1	0,25	—	1,6	1,9	—

**Содержание химических веществ в почвах на территории Фролихинского заказника
Баргузинского БЗ в августе 2014 г.**

№ точки (табл. 1)	Горизонт, см	Концентрация, мкг/г			Концентрация, нг/г			
		Pb	Cd	Cu	γ-ГХЦГ	Σ ДДТ	3,4-БП	1,12-БПД
1	0-8 (подстилка)	3,2	0,16	2,5	5,3	27,1	0,64	0,62
	8-11 (супесь)	4,7	0,08	4,4	0,63	6,3	0,32	0,5
	11-20 (песок)	3,5	0,04	3,1	0,5	18,2	0,24	0,12
2	0-8 (подстилка)	5,9	0,09	3,4	0,5	8,0	0,25	0,41
	8-10 (супесь)	4,6	0,05	1,6	0,5	10,0	0,25	0,21
	10-15 (песок)	4,0	0,04	2,8	0,5	27,4	0,25	0,21
3	0-4 (подстилка)	4,2	0,13	2,3	5,6	5,7	0,74	0,92
	4-8 (супесь)	3,8	0,04	3,5	4,2	2,1	0,19	0,31
	8-15 (песок)	8,4	0,09	4,6	2,5	5,6	0,32	0,26
5	0-6 (подстилка)	2,9	0,11	4,2	0,5	14,6	2,4	1,6
	6-9 (супесь)	2,1	0,03	1,2	7,7	2,2	1,28	1,32
	9-15 (песок)	3,8	0,03	2,7	1,9	10,7	0,64	0,79
Среднее	0-8	4,1	0,12	3,1	3,0	13,9	1,01	0,89
	8-11	3,8	0,05	2,7	3,3	5,2	0,51	0,59
	11-20	4,9	0,05	3,3	1,4	15,5	0,36	0,35

**Содержание химических веществ в почве в долине реки Осиновка на территории
Байкальского БЗ в сентябре 2012 г.**

Место отбора, высота	Горизонт, см	Концентрация, мкг/г			Концентрация, нг/г			
		Pb	Cd	Cu	γ-ГХЦГ	Σ ДДТ	3,4-БП	1,12-БПЛ
Альпийский луг в долине р. Осиновка (под гребнем хребта), 1276 м	0–5 (подстилка)	15	0,2	13	1,0	33,5	0,86	1,4
	5–10 (супесь)	5,0	0,2	12	0,2	17,2	0,23	0,52
Терраса верхнего пояса леса, 956 м	0–5 (подстилка)	11	0,2	14	0,1	10,7	0,59	2,73
	5–10 (супесь)	9,9	0,1	16	0,1	0,9	0,30	3,95
Правый склон долины р. Осиновка, 536 м	0–3 (подстилка)	10,5	0,2	11	0,52	1,0	0,68	7,0
	3–6 (супесь)	14	0,2	12	0,97	0,54	0,51	3,0
	6–10 (песок)	8,8	0,2	9,0	0,61	0,34	0,61	2,3
Среднее	0–5 (подстилка)	12,2	0,2	12,8	0,54	15,1	0,71	3,71
	5–10 (супесь)	9,4	0,2	12,3	0,47	4,7	0,41	2,44

Загрязнение почвы в южном Прибайкалье в сентябре 2011 г.

Характеристика мест отбора проб	Горизонт, см	Концентрация				
		Pb	Cd	Cu	Σ ДДТ	3,4-БП
		мкг/г				
Долина р. Утулик (левый берег, 0,7 км выше устья)	0-3 (подстилка)	9,0	0,3	13	26	0,56
	3-8 (гумус)	9,4	0,1	9,0	2	2,2
	8-13 (супесь)	5,7	0,1	4,5	35	3,5
Долина р. Солзан (0,3 км выше ж/д моста)	0-3 (подстилка)	10	0,3	14	57	1,7
	3-8 (гумус)	10	0,2	8,5	8,5	2,9
	8-13 (песчано- галечник)	4,0	0,1	5,0	24	1,0
Среднее	0-3 (подстилка)	9,5	0,3	13,5	42	1,1
	3-8 (гумус)	9,7	0,15	80,7	5,0	2,6
	8-13 (супесь)	4,9	0,1	4,7	39	2,3

Средние значения концентрации химических веществ в почвенном покрове в различных районах Прибайкалья в 2011–2014 гг.

Место измерения, год	Горизонт, см	Концентрация, мкг/г				Концентрация, нг/г			
		Hg	Pb	Cd	Cu	γ-ГХЦГ	Σ ДДТ	3,4-БП	
Долина р. Давша, 1983–1993	0–15	0,07	8,1	0,25	–	1,6	1,9	–	
	0–3	–	4,7	0,66	4,92	1,69	8,22	0,57	
	3–10	–	5,1	0,20	7,33	1,88	5,08	0,68	
	10–20	–	4,7	0,60	4,40	1,38	6,24	0,60	
Фролихинский заказник, 2014	0–8	–	4,1	0,12	3,1	3,0	13,9	1,01	
	8–11	–	3,8	0,05	2,7	3,3	5,2	0,51	
	11–20	–	4,9	0,05	3,3	1,4	15,5	0,36	
	0–5	–	12,2	0,2	12,8	0,54	15,1	0,71	
Долина р. Осиновка, 2012	5–10	–	9,4	0,2	12,3	0,47	4,7	0,41	
	0–3	–	9,5	0,3	13,5	–	42	1,1	
Южное Прибайкалье, 2011	3–8	–	9,7	0,15	80,7	–	5,0	2,6	
	8–13	–	4,9	0,1	4,7	–	39	2,3	

**Диапазон изменения и средние концентрации различных химических веществ
в растительности вдоль долины р. Давша на территории Баргузинского БЗ
за период наблюдений на станции КФМ с 1988 по 1991 г.**

№ площадки	Высота над уровнем моря, м	Концентрация, мкг/г			Концентрация, нг/г	
		Hg	Pb	Cd	γ-ГХЦГ	Σ ДДТ
Разнотравье						
1	460	0,01–0,1/0,04	0,5–3,8/1,85	0,09–0,2/0,10	0,1–14,0/6,05	20–56/29,2
2	480	0,005–0,05/0,03	0,2–1,9/0,91	0,1–0,27/0,18	0,05–5,5/1,62	0,6–16/7,86
3	518	0,01–0,05/0,005	0,1–1,6/0,9	0,2–0,33/0,25	0,06–5,7/2,15	0,5–12/5,90
4	535	0,005–0,14/0,052	0,5–3,5/2,3	0,2–0,67/0,37	0,05–19,8/4,6	1,4–21/11,67
5	720	0,004–0,17/0,061	0,2–2,1/1,82	0,17–2,1/0,67	0,1–5,3/2,72	0,5–16/8,95
6	1280	0,009–0,13/0,050	0,4–1,7/1,19	0,2–0,28/0,20	0,1–5,2/1,60	0,5–32/12,6
7	1395	0,01–0,06/0,03	0,3–1,7/1,27	0,15–0,3/0,21	0,1–2,35/0,63	0,5–17,5/8,45
Среднее		0,038	1,46	0,28	2,77	12,1
Хвоя кедр						
1	460	0,04	0,84	0,15	4,3–7,0/5,63	9,0
2	480	0,005–0,06/0,032	0,3–1,7/0,81	0,13–0,5/0,28	0,06–3,6/1,20	0,6–21/7,52
3	518	0,002–0,12/0,05	0,2–1,5/0,80	0,2–0,43/0,03	0,06–1,7/0,52	0,6–20/8,24
4	535	0,004–0,08/0,035	0,1–1,5/0,61	0,15–0,7/0,31	0,25–5,1/1,82	1,1–12/6,10
5	720	0,005–0,06/0,025	0,3–1,5/0,85	0,3–1,83/0,70	0,1–4,0/1,15	0,6–14/7,18

№ площадки	Высота над уровнем моря, м	Концентрация, мкг/г			Концентрация, нг/г	
		Hg	Pb	Cd	γ-ГХЦГ	Σ ДДТ
6	1280	0,11	0,2–0,5/0,34	0,18–0,2/0,20	0,1–2,4/0,84	0,35–8,7/3,20
7	1395	0,070	0,7–1,2/0,91	0,17–0,21/0,19	0,25–2,8/1,76	0,6–9,2/4,88
Среднее		0,051	0,74	0,27	1,85	6,6
Листва березы						
2	480	0,005–0,04/0,025	0,7–3,0/1,73	0,04–0,7/0,55	0,05–0,2/0,12	9,4
3	518	0,03–0,04/0,037	1,4–2,4/2,13	0,6–1,4/0,94	0,06–0,6/0,30	0,6–10/5,28
5	720	0,005	0,6–3,4/2,20	0,4–0,64/0,49	0,3–5,7/1,57	–
6	1280	0,005–0,02/0,012	1,0–2,0/1,49	0,26–0,4/0,32	0,1–1,7/0,57	1,4–18/9,79
Среднее		0,020	1,89	0,58	0,59	8,16
Мхи						
1	460	0,05	3,82	0,21	0,05	–
2	480	0,04–0,1/0,075	4,4–4,5/4,57	0,17–0,3/0,25	0,1–208/1,84	1,1–8,8/4,93
3	518	0,04–0,05/0,045	1,9–3,1/2,53	0,1–0,4/0,27	0,25–1,0/0,45	0,8–5,9/2,71
4	535	0,007–0,03/0,019	0,2–4,2/2,38	0,18–0,24/0,21	0,6–6,2/2,06	0,6–4,5/2,39
6	1280	0,02–0,05/0,033	6,9–25/14,2	0,26–3,3/1,26	0,25–6,7/2,06	0,6–5,7/2,56
7	1395	0,04–0,06/0,052	5,7–43/27,9	0,1–0,32/0,98	0,05–1,3/0,61	0,6–12,5/5,12
Среднее		0,046	9,23	0,53	1,18	3,97

**Концентрации некоторых химических веществ в растительности вдоль долины
реки Давша на территории Баргузинского БЗ в августе 2013 г.**

Вид растительности	Высота над уровнем моря, м	Концентрация, мкг/г			Концентрация, нг/г		
		Pb	Cd	Cu	γ-ГХЦГ	Σ ДДТ	3,4-БП
Хвоя кедра (свежий годовой прирост)	460	0,44	0,2	2,2	2,4	3,0	0,6
	518	0,72	0,33	1,1	3,9	9,9	0,24
	720	0,33	0,48	2,5	3,4	30,7	0,24
	1280	1,3	0,2	2,2	5,4	27,8	0,24
	1395	0,75	0,39	1,7	1,6	5,8	1,64
	Среднее	0,7	0,3	2,1	3,3	15	0,6
Лист берёзы	460	0,45	0,47	2,8	1,9	3,2	0,24
	518	0,36	0,88	2,7	1,1	1,9	0,24
	720	0,53	0,85	20,6	2,5	10,0	0,24
	1280	0,68	0,68	4,0	1,3	2,1	0,49
	1395	0,43	0,49	0,46	2,4	2,3	0,62
	1640	0,53	0,33	0,56	1,5	3,0	0,25
	Среднее	0,5	0,6	5,2	1,8	3,8	0,3

Вид растительности	Высота над уровнем моря, м	Концентрация, мкг/г			Концентрация, нг/г		
		Pb	Cd	Cu	γ-ГХЦГ	Σ ДДТ	3,4-БП
Лист бадана	460	0,42	0,08	0,87	3,7	46,2	0,6
	518	0,97	0,06	1,0	1,4	9,1	0,24
	720	1,4	0,27	2,6	5,5	23,1	0,24
	1280	0,42	0,14	1,2	3,8	24,5	0,24
	1395	0,29	0,17	3,2	1,8	3,9	0,31
	1640	0,5	0,18	2,4	3,4	13,8	0,31
	Среднее	0,7	0,15	1,9	3,3	20	0,3
Мох (головой прирост)	460	0,95	0,3	2,3	2,6	2,6	0,48
	518	1,8	0,42	2,4	2,6	3,6	0,48
	720	2,9	1,3	3,2	7,1	8,9	1,8
	1280	3,5	0,34	2,9	1,0	1,3	0,49
	Среднее	2,3	0,6	2,7	3,3	4,1	0,8

**Содержание химических веществ в растительности на территории
Фролихинского заказника Баргузинского БЗ**

№ точки	Концентрация					
	Pb	Cd	Cu	α-ГХЦГ	γ-ГХЦГ	Σ ДДТ
	мкг/г			нг/г		
	Хвоя кедр					
1	0,74	0,41	3,9	2,3	0,2	8,4
2	0,64	0,29	3,5	1,7	1,9	5,1
3 (кедр. стлан.)	0,27	0,11	2,4	2,5	0,2	0,2
4	1,3	0,3	2,8	2,5	1,6	9,2
Среднее	0,74	0,28	3,2	2,3	0,98	5,7
	Лист брусники					
1	0,39	0,07	3,2	1,8	0,2	8,7
2	0,66	0,09	3,9	2,0	0,2	7,9
3	0,27	0,08	3,0	0,8	0,2	20,2
4	0,43	0,06	5,9	3,4	0,2	7,3
Среднее	0,44	0,08	4,0	2,0	0,2	11,0
						0,21
						0,23

№ точки	Концентрация						
	Pb	Cd	Cu	α-ГХЦГ	γ-ГХЦГ	Σ ДДТ	1,12-БПЛ
	мкг/г			нг/г			
Лист бадана							
1	0,93	0,13	2,4	1,6	0,2	5,2	0,25
3	1,75	0,08	2,7	4,3	0,2	2,0	0,48
Среднее	1,34	0,11	2,6	3,0	0,2	3,6	0,37
Лист березы							
1	0,39	0,69	4,6	1,6	0,2	3,6	0,37
Мох плеврониум Шребера							
1	2,3	0,49	3,3	0,2	0,2	13,9	0,37
2	-	-	-	0,2	7,2	10,1	0,31
4	-	-	-	0,2	0,2	8,2	0,48
Среднее	2,3	0,49	3,3	0,2	2,5	10,7	0,39
							0,38

Содержание химических веществ в растительности в долине реки Осиновка на территории Байкальского БЗ в сентябре 2012 г.

Вид растительности	Высота над ур.м., м	Концентрация, мкг/г			Концентрация, нг/г			
		Pb	Cd	Cu	α-ГХЦГ	γ-ГХЦГ	Σ ДДТ	3,4-БП
Лист черники	536	1,0	0,17	5,8	4,75	3,14	0,75	0,13
	1510	1,1	0,19	4,3	1,2	2,6	33	0,16
	Среднее	1,05	0,18	5,1	3,0	4,4	19	0,15
Лист бадана	897	0,54	0,16	3,5	0,8	2,4	20	0,15
	1276	0,78	0,13	3,1	0,3	0,6	4,3	0,08
	Среднее	0,71	0,14	3,3	0,5	1,5	12	0,12
Лист папоротника	436	1,4	0,49	6,3	1,1	2,1	0,5	0,2
	855	1,5	0,21	5,5	1,4	2,5	0,5	0,26
	897	2,1	0,55	5,0	1,9	3,9	0,5	0,43
	1276	2,3	0,8	4,8	0,5	0,9	3,6	0,1
	Среднее	1,8	0,51	5,4	1,2	2,4	1,3	0,25
Хвоя кедра	536	1,8	0,27	4,7	1,46	2,14	0,5	0,1
	897	0,78	0,47	6,6	0,6	1,3	47,5	0,44
	956	1,2	0,25	3,4	2,0	5,4	1,7	0,44
	1276	0,54	0,31	8,5	0,5	0,4	8,0	0,94
	Среднее	1,08	0,33	5,8	1,97	2,4	14	0,48

**Содержание химических веществ в растительности в предгорьях южного
Прибайкалья в сентябре 2011 г.**

Номера и характеристика точек отбора проб	Вид растительности	Концентрация					
		мкг/г			нг/г		
		Pb	Cd	Cu	Σ ДДГ	3,4-БП	1,12-БПЛ
№1. Долина р. Утулик (ле- вый берег 0,7 км выше устья)	Папоротник	0,7	0,9	5,0	51	0,14	0,47
	Хвоя кедра	0,7	0,7	10	6	0,10	0,79
	Лист березы	1,3	0,2	4,8	2,3	0,06	0,15
	Мох	2,0	0,1	4,8	13	0,19	0,46
№2. Долина р. Солзан (0,3 км выше ж/д моста)	Папоротник	0,5	0,3	3,9	3,1	0,28	6,6
	Хвоя кедра	1,0	0,3	3,9	8,3	0,28	0,95
	Лист березы	3,0	0,2	5,0	0,6	0,32	1,1
	Осока	2,4	0,0	6,4	6,8	0,56	5,4
Среднее	Папоротник	0,6	0,6	4,5	27	0,21	3,5
	Хвоя кедра	0,85	0,5	7,0	7,2	0,19	0,87
	Лист березы	2,2	0,2	4,9	1,5	0,19	0,62
	Мох	2,0	0,1	4,8	13	0,19	0,46

**Сравнение осредненных значений концентрации различных химических веществ
в растительности (по видам растений) в различных частях Прибайкалья**

Район и год наблюдения	Концентрация, мкг/г			Концентрация, нг/г			
	Pb	Cd	Cu	α-ГХЦГ	γ-ГХЦГ	Σ ДДТ	3,4-БП
	Разнотравье (включая: лист брусники, папоротника, бадана)						
Долина р. Давша, 1988–1991	1,5	0,28	–	–	2,8	12	–
Долина р. Давша, 2013	0,7	0,15	1,9	–	3,3	20	0,30
Долина р. Осиновка, 2012	0,9	0,16	4,3	1,8	3,0	16	0,14
Фролихинский заказник, 2014	0,9	0,10	3,6	2,1	0,2	7,3	0,29
Южное Прибайкалье, 2011	0,6	0,60	4,5	–	–	2,7	0,21
Среднее	0,92	0,26	3,8	2,0	2,3	11,6	0,24
	Хвоя кедра						
Долина р. Давша, 1988–1991	0,74	0,27	–	–	2,8	6,6	–
Долина р. Давша, 2013	0,70	0,30	2,1	–	3,3	15	0,6
Долина р. Осиновка, 2012	1,08	0,33	5,8	2,0	3,0	14	0,5
Фролихинский заказник, 2014	0,74	0,28	3,2	2,3	0,2	5,7	0,44
Южное Прибайкалье, 2011	0,85	0,5	7,0	–	–	7,2	0,19
Среднее	1,02	0,36	4,5	2,15	2,3	7,7	0,43

Район и год наблюдения	Концентрация, мкг/г			Концентрация, нг/г		
	Pb	Cd	Cu	α-ГХЦГ	γ-ГХЦГ	3,4-БП
Лист березы						
Долина р. Давша, 1988–1991	1,9	0,6	–	–	0,6	8,2
Долина р. Давша, 2013	0,5	0,6	5,2	–	1,8	3,8
Долина р. Осиновка, 2012	0,7	0,14	3,3	0,5	1,5	12
Фролихинский заказник, 2014	0,4	0,7	4,6	1,6	0,2	3,6
Южное Прибайкалье, 2011	2,2	0,2	4,9	–	–	1,5
Среднее	1,14	0,45	4,5	1,0	1,0	5,8
Мхи						
Долина р. Давша, 1988–1991	9,2	0,53	–	–	1,2	4,0
Долина р. Давша, 2013	2,3	0,60	2,7	–	3,3	4,1
Долина р. Осиновка, 2012	–	–	–	–	–	–
Фролихинский заказник, 2014	2,3	0,49	3,3	0,2	0,2	13,9
Южное Прибайкалье, 2011	2,0	0,10	4,8	–	–	13,0
Среднее	4,0	0,43	3,6	0,2	1,6	8,8

Сравнение результатов по содержанию тяжелых металлов в образцах различных видов растительности показывает, что наибольшие концентрации свинца были обнаружены в пробах мха — до 9,2 мкг/г, при среднем содержании около 2 мкг/г. Концентрации кадмия и меди во всех изучаемых образцах растительности были близким и составляли около 0,4 и 4,0 мкг/г соответственно. Содержание хлорорганических пестицидов и полиароматических углеводородов также было низким и существенно не изменялось ни по видам растительности, ни по району наблюдения.

Выводы

Анализ представленного массива данных показывает, что за весь рассматриваемый период времени существенных изменений качества поверхностных вод, почвы и растительности на исследованных территориях ООПТ в Прибайкалье не обнаружено. Концентрации всех химических веществ во всех природных средах имеют низкие и близкие по величине значения. Отдельные вариации имеют локальный пространственный и временной характер.

Содержание рассматриваемых тяжелых металлов в поверхностных водах рек неоднородно и, по-видимому, в основном определяется составом залегающих горных пород. Концентрации ХОП эпизодически имели повышенные значения, что может быть связано с их несанкционированным применением при борьбе с комарами и лесными вредителями. Не исключена возможность переноса ДДТ с северо-восточной части Байкальского хребта. Значения концентраций всех измерявшихся в устьях рек и прибрежной акватории озера Байкал химических веществ соизмеримы.

Содержание металлов в исследованных образцах почвенного покрова (слой 0–20 см) низкое и имеет близкие значения на всех исследованных территориях. Для ХОП и ПАУ отмечается их несколько более высокое содержание в верхнем гумусовом горизонте (0–5 см).

В различных видах растительности содержание химических веществ меняется незначительно и территориально однородно. На территории Байкальского БЗ наибольшие концентрации Σ ДДТ во всех видах растительности отмечались в верхнем высотном поясе.

По результатам обследований 2010–2014 гг. возможными местами размещения новой станции КФМ на озере Байкал могут быть рекомендованы устье р. Мишиха (северная граница Байкальского БЗ) или прибрежная зона губы Аяя вблизи устья реки Фролиха, при условии организации там, на базе кордона Фролихинского заказника, энергоснабжения требуемой мощности за счёт ветряного или солнечного источника.

Сравнение результатов, полученных на территориях Прибайкалья, с данными сети станций КФМ РФ [9, 12] показывает, что по большинству химических показателей, кроме ДДТ и ГХЦГ, регион озера Байкал является более чистым.

Исследование выполнено в рамках темы 4.5 НИОКТР Росгидромета, регистрационный номер 125031703848-8 «Развитие и модернизация методов и технологий комплексного фоновый мониторинга и комплексной оценки состояния и загрязнения окружающей среды РФ и ее динамики (по интегрированным результатам сетей мониторинга Росгидромета)».

Литература

1. Филиппова Л.М., Анохин Ю.А., Остромильский А.Х., Матвеев А.А. Комплексный фоновый мониторинг окружающей природной среды на Байкале: цели и задачи, история и перспективы // Комплексный глобальный мониторинг загрязнения окружающей природной среды : Труды II Международного симпозиума. Л. : Гидрометеиздат, 1982. С. 78–85.
2. Израэль Ю.А., Анохин Ю.А. Мониторинг природной среды в регионе озера Байкал // Проблемы регионального мониторинга состояния озера Байкал. Л. : Гидрометеиздат, 1983. С. 4–11.
3. Анохин Ю.А. Комплексный фоновый мониторинг озера Байкал: современное состояние и перспективы // Мониторинг фоновый загрязнения природных сред. Л. : Гидрометеиздат, 1984. Вып. 2. С. 132–144.

4. Анохин Ю.А., Кокорин А.О., Салиев А.В., Пуртова Л.Я., Зильберштейн И.А. Атмосферный воздух и осадки // Мониторинг состояния озера Байкал. Л. : Гидрометеиздат, 1991. С. 35–44.
5. Израэль Ю.А. Глобальная система наблюдений. Прогноз и оценка окружающей природной среды. Основы мониторинга // Метеорология и гидрология. 1974. № 7. С. 3–8.
6. РД 52.04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. Дата введения 1991-07-01. М. : Госкомгидромет, 1991. Ч. III. С. 521–588.
7. РД 52.44.916-2021. Организация и проведение режимных наблюдений за фоновым состоянием загрязнения окружающей среды и трансграничным переносом загрязняющих веществ. Утвержден 29.11.2021. М. : Росгидромет, 2021. 36 с.
8. Александрова И.И. Мониторинг загрязнения Северного Прибайкалья. Государственный природный заповедник «Баргузинский». Улан-Удэ : Зебра, 2006. 106 с.
9. Обзор фоновое состояние окружающей природной среды на территории стран СНГ за 1998 г. и его динамики за последние десять лет / под ред. Ю.А. Израэля. СПб. : Гидрометеиздат, 1999. 120 с.
10. Алексеев Л.П., Георгиевская В.Ю., Аниканова М.Н. и др. Современное состояние озера Байкал по данным мониторинга Росгидромета // Метеорология и гидрология. 2019. № 10. С. 18–29.
11. Бурцева Л.В., Пастухов Б.В., Безделова А.П., Патракеева Н.В. Содержание тяжелых металлов в образцах растительности и почвы по высотным поясам долины р. Давша Баргузинского государственного природного биосферного заповедника им. К.А. Забелина за 2013 г.: База данных. Правообладатель ФГБУ «ИГКЭ» Росгидромета и РАН. Свидетельство о регистрации в Реестре баз данных № 2018620862. Дата регистрации 18.06.2018 г.
12. Обзор фоновое состояние окружающей природной среды на территории стран СНГ за 2015 г. / под ред. Г.М. Черногаевой. М. : Росгидромет, 2017. С. 44–49, 60.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА ПОГОДЫ GRAPHCAST ДЛЯ УРАЛО-СИБИРСКОГО РЕГИОНА

А.Б. Колкер, А.В. Гочаков, Т.Ф. Газимов, И.В. Дель

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

Представлены результаты оценки прогностических возможностей нейросетевой модели прогноза погоды GraphCast для Урало-Сибирского региона в случаях ее инициализации полями различных источников. Проведена оценка ряда атмосферных параметров с использованием единого набора весов, обученного на реанализе ERA5. Проведено сравнение с данными наблюдений и реанализа. Рассчитаны ошибки прогноза в сравнении с фактическими наблюдаемыми данными и полями реанализа ERA5.

Ключевые слова: нейросетевая модель, прогноз погоды, реанализ, Урало-Сибирский регион

STUDY OF THE CAPABILITIES OF THE GRAPHCAST NEURAL NETWORK WEATHER FORECASTING MODEL FOR THE URAL-SIBERIAN REGION

A.B. Kolker, A.V. Gochakov, T.F. Gazimov, I.V. Del

Siberian Regional Hydrometeorological Research Institute, Novosibirsk

The results of assessing the forecast capabilities of the GraphCast neural network weather forecasting model for the Ural-Siberian region in cases of its initialization with fields of different sources are presented. A number of atmospheric parameters are estimated using a single set of weights trained on ERA5 reanalysis. A comparison with observational and reanalysis data is made. Forecast errors are calculated in comparison with actual observed data and ERA5 reanalysis fields.

Keywords: neural network model, weather forecast, reanalysis, Ural-Siberian region

Введение

Нейросетевые технологии прочно обосновались во многих областях науки и техники и занимают все новые ниши, подчас совершенно неожиданные. Современная метеорология переживает этап активной трансформации, связанный с внедрением передовых технологий искусственного интеллекта и машинного обучения. Нейросетевые технологии, обладающие уникальной способностью анализировать большие объемы данных и выявлять сложные закономерности, становятся важным инструментом в решении задач прогнозирования погоды и климатических изменений. Скорость прогресса в повышении качества численных прогнозов погоды (ЧПП), основанных на физико-математических моделях, ограничена развитием вычислительных технологий, а также возможностями в описании физических процессов в атмосфере. Благодаря способности выявлять сложные зависимости и паттерны, современные нейросети зачастую превосходят традиционные методы моделирования, фантастически ускоряя расчеты, демонстрируя при этом схожий результат.

Методы ЧПП повторяют математически, с упрощениями и допущениями, физические законы, по которым работает природа. Наши знания о физике процессов и возможности математики для их представления непрерывно совершенствуются, однако все детали пока неизвестны и вряд ли будут когда-либо полностью воспроизведены.

Численные прогнозы погоды эффективно масштабируются при увеличении вычислительных ресурсов, что позволяет производить расчеты в более высоком пространственном разрешении и для более сложных расчетных схем за допустимое для оперативных прогнозов время [1].

Основной способ совершенствования методов ЧПП — это разработка более совершенных моделей, численных схем, алгоритмов и аппроксимаций, что является трудоемким и дорогостоящим процессом.

Методы машинного обучения (МО) пытаются подстроиться под закономерности процессов и явлений без понимания их физической сути, решая задачу путем анализа очень большого объема обучающих данных. В широком спектре научных областей точность методов на основе МО может возрастать по мере поступления большого объема данных высокого качества, часто при гораздо меньшем вычислительном бюджете. Чем больший объем данных будет использован при обучении, тем больше шансов, что будут найдены закономерности, а случайности будут проигнорированы. Современные системы прогнозирования погоды на основе МО начинают превосходить по качеству модели прогнозирования на основе ЧПП. В качестве примера можно привести субсезонные прогнозы тепловых волн [2] и прогнозирование осадков как с использованием информации ЧПП, так и без нее [3].

Для повышения качества ЧПП потребуется решить следующие задачи:

- открыть еще более тонкие детали физики атмосферы, океана, почвы и космоса, найти взаимосвязи, описать их;
- представить найденные физические законы, используя математический аппарат;
- создать программу, которая реализует математический алгоритм в виде программного кода с использованием параллелизма;
- нарастить вычислительные мощности соответственно требованиям производительности.

Очевидно, что все эти шаги чрезвычайно трудоемки и требуют слаженной работы высокопрофессиональных специалистов из разных областей науки и техники, что и происходит на протяжении 70-летней истории развития ЧПП. Как уже неоднократно отмечалось, увеличение мощности вычислительного комплекса — один из наиболее значимых факторов для улучшения прогноза. К сожалению, для построения вычислительных систем требуемой мощности нужны астрономические финансовые ресурсы. Так, например, в MetOfficeUK на эти цели

в 2022 г. было согласовано выделение 1.2 миллиарда фунтов стерлингов [4].

По разным причинам, в первую очередь финансовым, развитие систем ЧПП во всем мире в основном происходит в рамках государственных программ. Основные мировые точки развития — научно-прогностические центры MetOffice (Великобритания), DWD (Германия), NCEP (США), MeteoFrance (Франция), Росгидромет (РФ) — научные и научно-производственные структуры, спонсируемые на государственном уровне правительствами.

Для развития систем машинного обучения потребуется решить другие задачи, а именно:

- улучшить архитектуру алгоритма МО;
- задействовать больший объем качественных данных;
- построить графический ускоритель соответствующей мощности. Увеличение мощности вычислителя полезно, но не является главным фактором улучшения прогноза.

История нейросетевого прогноза в метеорологии гораздо более коротка (10–15 лет) и развивалась она нелинейно.

Считается, что развитие идей нейросетевых вычислений восходит к работе [5], книге [6] и к перцептрону Фрэнка Розенблатта [7]. Серьезный вклад в алгоритмику процесса обучения внес Кунихо Фукусима [8], однако долгое время эти технологии не получили своего развития, пока в 1997 г. Ян Лекун не создал сверточную нейронную сеть [9].

В СибНИГМИ проводились аналогичные работы под руководством д.ф.-м.н. Л.Н. Романова [10]. По сути, Л.Н. Романов предвидел появление таких алгоритмов, но доступный на тот момент математический аппарат еще не позволял полностью решить такую проблему.

Публикации о первых результатах нейросетевого прогноза, конкурентных с ЧПП, начали появляться в 2022 г. [11, 12].

Вычислительные мощности для машинного обучения оказываются в десятки, а то и в сотни раз дешевле мощностей, которые требуются для расчетов ЧПП. При этом основные

ресурсы требуются для организации процесса машинного обучения на основе длинной выборки обучающего набора данных, в то время как для регулярной эксплуатации необходимы гораздо меньшие ресурсы. В минимальном варианте исследователи могут выполнять разработки, даже используя настольный персональный компьютер. Множество центров данных предлагают в облачную аренду вычислительные мощности, достаточные для решения подобных задач, что делает развитие МО доступным даже небольшим командам, обладающим ограниченным бюджетом.

Лидерство в настоящий момент принадлежит четырем командам:

- модель FourCastNetv2, которая поддерживается компанией NVIDIA, шаг сетки 0.25° ;
- модель Graphcast от команды GoogleDeepMind, шаг сетки 1° и 0.25° ;
- Pangu-Weather китайской мегакорпорации Huawei, шаг сетки 0.25° ;
- AIFS от Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF).

Также многие другие команды ведут свои оригинальные исследования в данной области [13].

Традиционным гидродинамическим моделям потребовались десятилетия, чтобы достичь таких показателей, которые нейросетевые модели погоды показали на старте [12]. Тем не менее нельзя обойти стороной следующие важные факты.

Обучение нейросетевой модели требует большого архива глобального реанализа, который сформирован с использованием достижений ЧПП.

Для расчета нейросетевой модели в текущих их реализациях требуются начальные поля (данные для инициализации прогноза на основе МО) — несколько последовательных массивов реанализа или ассимиляции, которые есть результат тех самых десятилетий совершенствования ГДМ и ЧПП. Тем не менее ведутся активные работы по созданию алгоритмов

нейросетевой ассимиляции данных и в ближайшее время, вероятно, монополия ГДМ в этом аспекте также будет разрушена.

Традиционный путь создания обучающих наборов данных состоит в использовании общедоступных полей реанализа ERA5 [14] с горизонтальным разрешением 0.25° . Цель реанализа — используя современные численные модели, а также массивы данных наблюдений и расчетов в предыдущие моменты времени, попытаться воспроизвести метеорологические характеристики в узлах сетки в заданный момент времени. Чем лучше реанализ, тем ближе его данные к фактическим наблюдениям.

Крупные исследовательские центры, такие как DWD, ECMWF, имеют возможность оперировать реанализом и с более детальной сеткой, но в публичном доступе пока такие наборы данных не представлены. Обучение нейросетевой структуры сводится к решению математической задачи минимизации функции потерь, таким образом, обученная модель стремится к воспроизведению закономерностей, присутствующих в данных реанализа, выступавшего в качестве исходного набора данных.

Цель настоящей работы заключается в получении количественной оценки качества нейросетевого прогноза погоды модели GraphCast, а также анализ влияния различных вариантов данных о начальной динамике атмосферы (данных для инициализации прогноза) на результаты прогноза, в том числе в сравнении с данными наблюдений на метеостанциях.

Материалы и методы

Для экспериментов использовалась модель Google Deep Mind GraphCast [15] с разрешением 1° . Для 0.25° -сетки оценивалось время вычисления на CPU, при сравнении на 1° -сетке обе модели показывали одинаковые результаты.

GraphCast — это модель прогнозирования погоды, разработанная командой Google DeepMind, использующая технологии искусственного интеллекта для обеспечения более точных и

быстрых прогнозов по сравнению с традиционными методами [15].

GraphCast использует графовые нейронные сети, представляя глобальные метеорологические данные в виде сетки с разрешением $0,25^\circ$ по долготе и широте (примерно 28×28 км). В каждой точке сетки модель анализирует пять параметров: температуру, скорость и направление ветра, давление и влажность на 37 р-уровнях. В качестве начальных условий требуются два поля с шагом 6 ч. Существует вариант для запуска на ограниченных вычислительных ресурсах — 1° -сетка и 13 р-уровней. Модель доступна по лицензии Apache License 2.0. В работе сравниваются возможности нейросетевого прогноза GraphCast с использованием весовых коэффициентов, полученных в результате обучения по данным реанализа ERA5 от различных данных инициализации прогноза. Предобученные весовые коэффициенты [16] доступны по лицензии NC-CA-4 [17]. Для форсинга прогноза используется набор прогностических параметров численного прогноза погоды с временным интервалом 6 ч. Горизонтальная и вертикальная структуры данных должны соответствовать структуре, по которой обучалась модель (ERA5). Оперативные прогнозы GraphCast, выпускающиеся в ECMWF, используют прогностические переменные модели IFS [18]. Для эксперимента был подготовлен набор данных, построенный по прогнозам глобальной модели ICON [19].

Процедура подготовки данных для инициализации прогноза (IFS, ICON, ERA5) включает в себя интерполяцию горизонтальной структуры данных на широтно-долготную сетку с шагом 0.2° (в случае ICON) и последующее редуцирование сетки до горизонтального шага сетки 1° с реорганизацией горизонтальной координаты в соответствии со структурой данных GraphCast. Также произведено приведение единиц измерения для части параметров: значения геопотенциала к единицам измерения $\text{м}^2/\text{с}^2$, вертикальные скорости — к единицам $\text{Па}/\text{с}$, осадки — метр за период накопления.

В качестве вычислительной платформы используется настольный сервер с характеристиками I9-9090, 64 Гб ОЗУ, оснащенный графической картой Nvidia 1080ti с оперативной памятью 12 Гб. Сервер управляется ОС Ubuntu Linux 24.04 LTS. Вычислительные ресурсы позволяют запускать модели 1-13, 1-37 (сетка 1° на 13 или 37 уровнях) на GPU. Расчет 1 шага в конфигурации «1°» выполняется за 10 с. Для расчета 40 шагов потребуется 47 с, при этом 5 с уходит на подготовку исходных массивов и подготовки данных форсинга. В процессе выполнения задачи использовано 2.6 Гб оперативной памяти GPU и 27 Gb ОЗУ (в текущей реализации инфраструктуры запуска, данное число может быть уменьшено при оптимизации). Конфигурации 0.25-13 и 0.25-37 требуют количество оперативной памяти GPU, не доступное в данной системе, но могут быть рассчитаны на CPU (16 потоков) за приемлемое время (155 с на один шаг прогноза), при этом препроцессинг (расчет солнечной радиации) может быть выполнен на GPU и требует 8945 Мб ОЗУ GPU.

Результаты

В настоящей работе проведена оценка качества нейросетевого прогноза GraphCast для Урало-Сибирского региона. Для инициализации использовались поля атмосферных параметров за сроки 22 марта 00 и 06 UTC, сформированные на основе данных трёх источников: ICON, ERA5 и IFS. В качестве примера рассмотрен прогноз, рассчитанный от 22 марта 2025 г. с заблаговременностями от 12 до 240 ч и шагом по времени 6 ч. Заблаговременности прогноза на 00 и 06 UTC не представлены, т.к. используются нейросетевой моделью (начальные данные инициализации).

Проведено сравнение наблюдений на метеостанциях (МС) и прогностических значений для двух приземных метеорологических характеристик: температуры воздуха и скорости ветра. Оценка проводилась для модельных ячеек (шаг сетки $1^\circ \times 1^\circ$), включающих в себя окрестности г. Новосибирска

(МС Учебная, Огурцово, Искитим, Коченево) и окрестности г. Улан-Удэ (МС Кабанск, Улан-Удэ (город), Улан-Удэ-Мухино).

На рис. 1–4 представлены прогностические значения температуры воздуха и скорости ветра в сравнении с наблюдениями на метеорологических станциях (МС). Визуализация наблюдений на МС выполнена в виде закрашенной области, отражающей диапазон фактических значений (от минимального до максимального) по метеостанциям, расположенным внутри соответствующей модельной ячейки. Такой подход позволяет учитывать пространственную неоднородность наблюдений, поскольку одна модельная ячейка может включать в себя сразу несколько метеостанций, и использование только одного значения оказалось бы недостаточно репрезентативным.

Прогноз температуры воздуха для окрестностей Улан-Удэ (рис. 1) в целом демонстрирует более низкие по сравнению

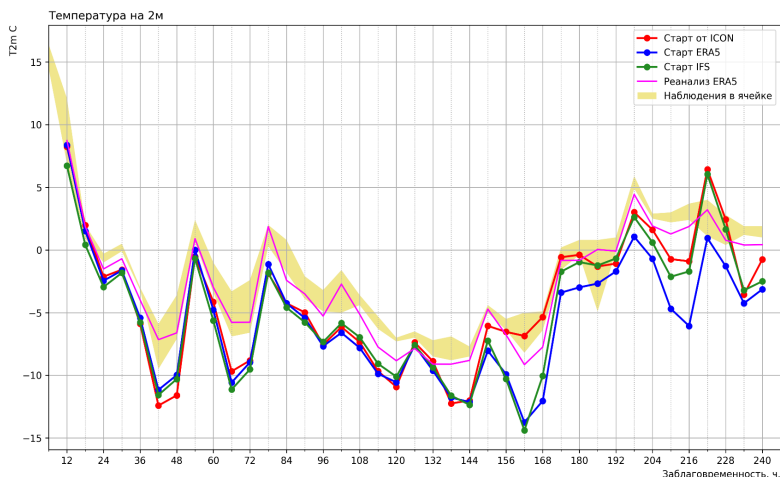


Рис. 1. Прогностические значения температуры воздуха в зависимости от данных для инициализации прогноза для окрестностей г. Улан-Удэ. Прогноз от 22-03-2025 00 ВСВ

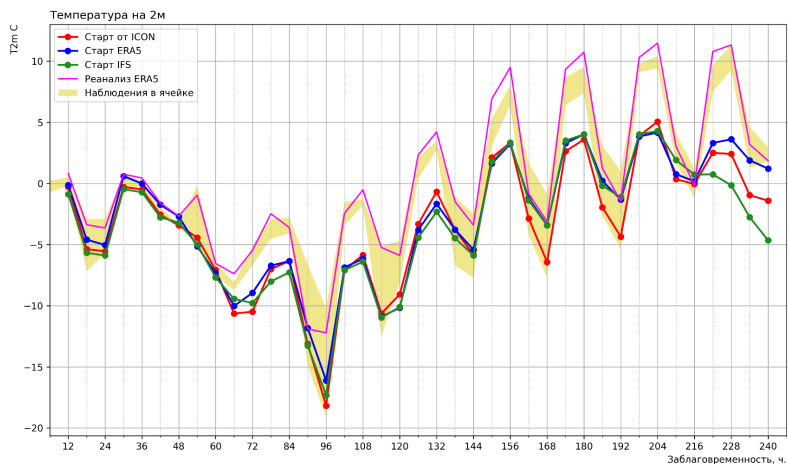


Рис. 2. Прогностические значения температуры воздуха в зависимости от данных для инициализации прогноза для окрестностей г. Новосибирск. Прогноз от 22-03-2025 00 ВСВ

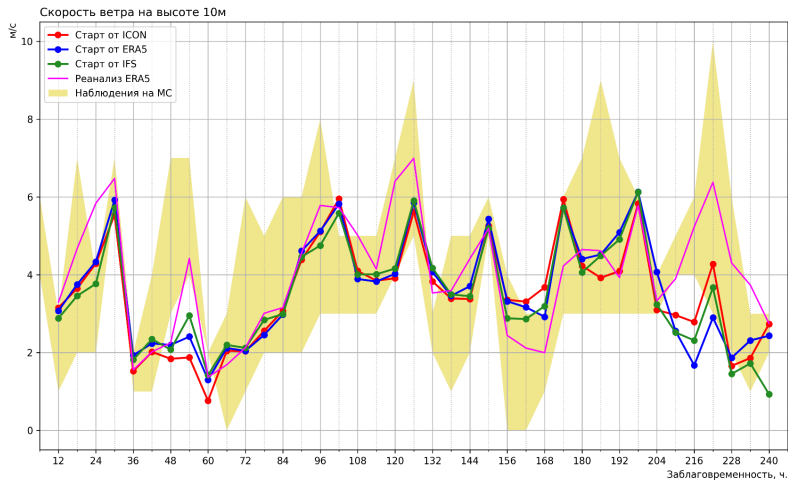


Рис. 3. Прогностические значения скорости ветра в зависимости от данных для инициализации прогноза для окрестностей г. Улан-Удэ. Прогноз от 22-03-2025 00 ВСВ

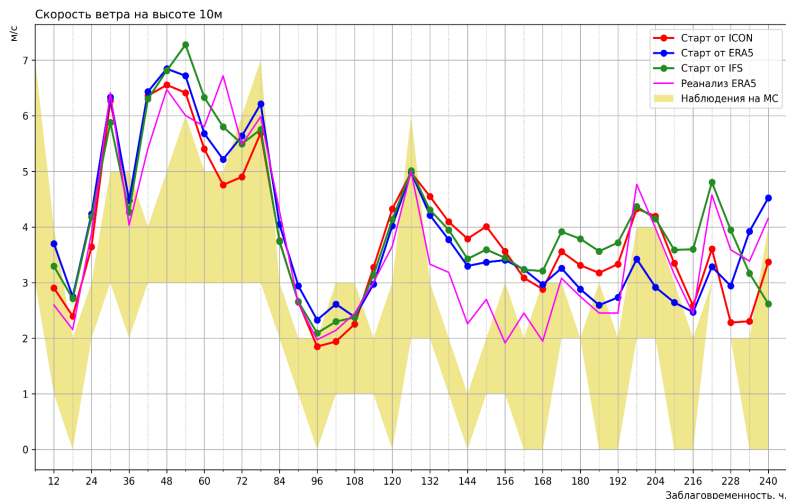


Рис. 4. Прогностические значения скорости ветра в зависимости от данных для инициализации прогноза для окрестностей г. Новосибирск. Прогноз от 22-03-2025 00 BCB

с наблюдаемыми значениями для всех заблаговременностей. Для метеостанций Новосибирска (рис. 2) наблюдается хорошее соответствие с фактическими значениями в течение первых 60 ч прогноза, однако с увеличением заблаговременности также отмечается тенденция к занижению температуры воздуха.

Различия между вариантами инициализации (ICON, ERA5, IFS) в целом незначительны, однако становятся более заметными на сроках прогноза свыше 144 ч, особенно в окрестностях Улан-Удэ (рис. 1). Следует отметить, что при использовании данных инициализации ICON прогностические значения температуры воздуха для Улан-Удэ после 144 ч оказываются ближе к фактическим, чем прогнозы на основе ERA5 и IFS.

Скорость ветра (рис. 3, 4) является более неоднородным по пространству параметром, что подтверждается значительными различиями между минимальными и максимальными значениями, наблюдаемыми на разных метеостанциях в пре-

делах одной модельной ячейки. Эта пространственная вариативность особенно заметна по сравнению с температурой воздуха для этого же прогноза (рис. 1, 2).

Для метеостанций Улан-Удэ (рис. 3), расположенных в районе со сложным рельефом, прогностические значения скорости ветра в среднем не демонстрируют явной тенденции к систематическому завышению или занижению, оставаясь в пределах наблюдаемого диапазона. В случае Новосибирска (рис. 4) прослеживается определённая систематичность: скорость ветра несколько завышена относительно среднего по ячейке, но при этом близка к максимальным фактическим значениям.

Отличия между прогнозами, полученными при различных вариантах инициализации, незначительны для Улан-Удэ и становятся более выраженными для Новосибирска на сроках свыше 120 ч. При этом прогноз на основе данных ERA5 для окрестностей Новосибирска в данном случае демонстрирует наибольшее соответствие с наблюдаемыми значениями.

Была проведена оценка среднеквадратической ошибки прогноза GraphCast в сравнении с данными реанализа ERA5 (рис. 5–7) для следующих метеорологических параметров: температуры воздуха на высоте 2 м и на уровне 850 гПа, а также геопотенциала на уровне 500 гПа. Анализ охватывал территорию Урало-Сибирского региона (50° – 70° с.ш., 60° – 120° в.д.). Методика оценки RMSE соответствует подходу, представленному в оригинальной работе по модели GraphCast [12].

Для всех рассматриваемых параметров характерно общее поведение ошибок прогноза: для заблаговременностей от 72 до 132 ч различия в значениях RMSE между прогнозами с разными источниками инициализации несут незначительный характер. Однако по мере увеличения заблаговременности наблюдается постепенное нарастание расхождений.

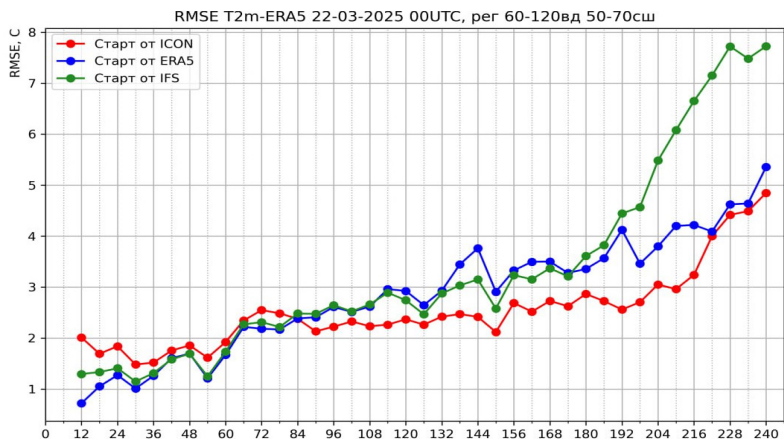


Рис. 5. Среднеквадратическая ошибка (RMSE) прогноза температуры воздуха на высоте 2 м в сравнении с данными реанализа ERA5. Прогноз от 22-03-2025 00 ВСВ для региона 60°–120° в.д., 50°–70° с.ш.

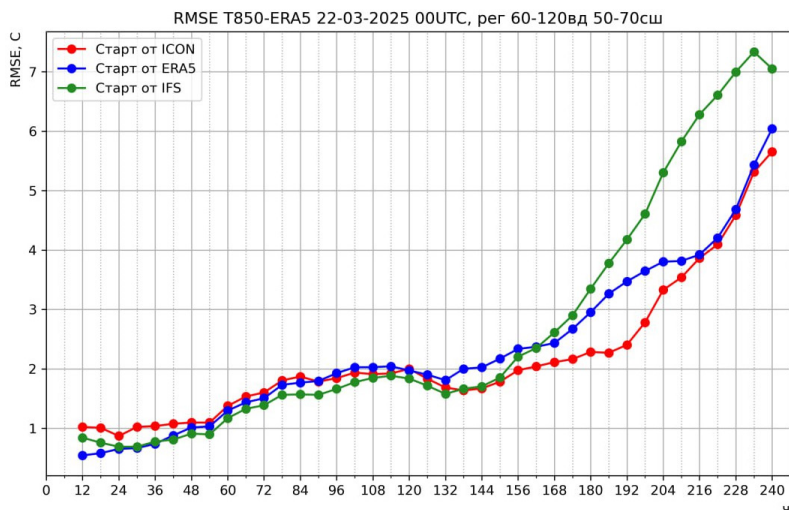


Рис. 6. Среднеквадратическая ошибка (RMSE) прогноза температуры воздуха на уровне 850 гПа в сравнении с данными реанализа ERA5. Прогноз от 22-03-2025 00 ВСВ для региона 60°–120° в.д., 50°–70° с.ш.

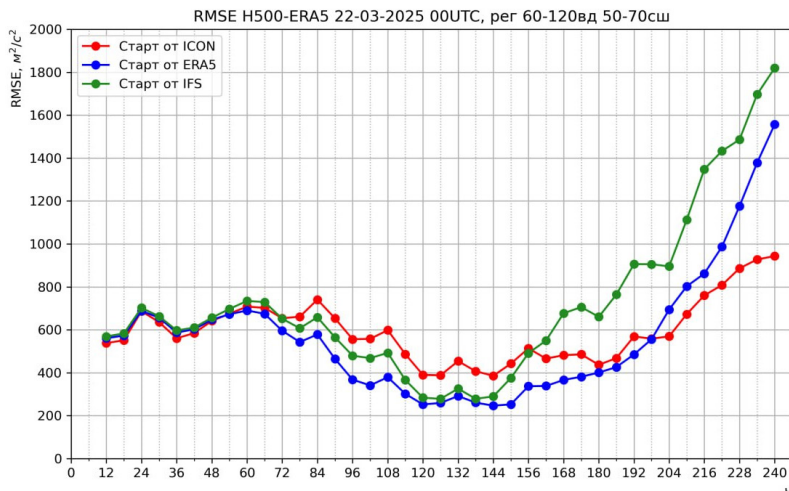


Рис. 7. Среднеквадратическая ошибка (RMSE) прогноза геопотенциала ($\text{м}^2/\text{с}^2$) на уровне 500 гПа в сравнении с данными реанализа ERA5. Прогноз от 22-03-2025 00 UTC для региона $60^\circ\text{--}120^\circ$ в.д., $50^\circ\text{--}70^\circ$ с.ш.

Следует отметить, что на уровне 850 гПа температура воздуха демонстрирует более устойчивую согласованность между инициализационными данными по сравнению с температурой на высоте 2 м: различия в RMSE остаются незначительными до 132 ч. Это может свидетельствовать о том, что модель менее адекватно воспроизводит влияние подстилающей поверхности, что отражается на прогнозе температуры воздуха у земли. Наименьшая ошибка для температуры воздуха как на уровне 2 м, так и на уровне 850 гПа соответствует прогнозу при использовании данных ICON для инициализации прогноза.

В случае прогноза геопотенциала на уровне 500 гПа расхождения между различными вариантами инициализации начинают проявляться с заблаговременности в 72 ч.

Прогноз с использованием данных ERA5 в целом демонстрирует наименьшие значения ошибок. Однако, начиная с 144 ч, наблюдается рост ошибки как для ERA5, так и особенно для прогноза, инициализированного с помощью данных IFS. Напротив, прогноз с инициализацией от ICON сохраняет

более стабильное качество прогноза для всех заблаговременностей, не превышая значения RMSE в $1000 \text{ м}^2/\text{с}^2$ к концу прогноза.

Важно отметить, что в целях удобства сравнения полученных результатов приведенные значения RMSE геопотенциала представлены в единицах $\text{м}^2/\text{с}^2$, в соответствии с оригинальной статьёй [12]. Для перевода в геопотенциальные метры значения геопотенциала следует делить на ускорение свободного падения ($9.8 \text{ м}/\text{с}^2$).

Дополнительно была рассчитана RMSE для температуры воздуха на высоте 2 м по данным прогноза GraphCast (с различными источниками инициализации: ICON, ERA5, IFS) и по данным реанализа ERA5, в сравнении с фактическими наблюдениями на метеостанциях (рис. 8). Для расчёта использовался следующий алгоритм: для каждого узла сетки производился

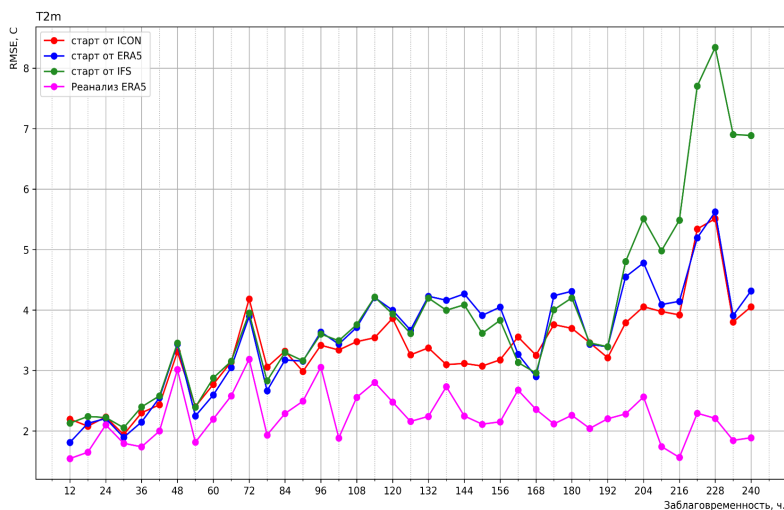


Рис. 8. Среднеквадратическая ошибка (RMSE) температуры воздуха на высоте 2 м по данным GraphCast с различными данными для инициализации и реанализа ERA5 в сравнении с фактическими наблюдениями на метеостанциях. Прогноз от 22-03-2025 00 BCB для региона 60° – 120° в.д., 50° – 70° с.ш.

поиск метеостанций, расположенных не далее 0.4° ; если в область попадало несколько метеостанций, значения температуры усреднялись. Далее сравнивались значения температуры воздуха, полученные из данных GraphCast и ERA5, с наблюдаемыми значениями на соответствующих станциях.

Результаты показывают, что наименьшее значение ошибки демонстрирует реанализ ERA5, причём RMSE остаётся стабильной на всём протяжении прогноза. Вместе с тем для ERA5 характерно локальное увеличение ошибки в утренние часы по местному времени (07:00) в пределах первых четырёх суток прогноза (48, 72 и 96 ч заблаговременности), после чего значения RMSE постепенно сглаживаются. Аналогичное поведение ошибки наблюдается и для прогнозов GraphCast: при заблаговременностях 48 и 72 ч также наблюдается локальное увеличение ошибки.

Сравнение различных источников инициализации для одного прогноза показало, что наименьшие значения RMSE среди прогнозов GraphCast достигаются при использовании данных ICON. Напротив, использование данных IFS приводит к значительному увеличению ошибки для прогноза на последние сутки.

Полученные результаты демонстрируют в целом хорошую согласованность между прогнозами, рассчитанными с использованием различных источников данных для инициализации GraphCast. Это может указывать на устойчивость модели к замене исходных полей инициализации, а также на потенциальную возможность использования альтернативных источников, отличных от данных реанализа ERA5, несмотря на то, что обучающие данные модели были получены именно на их основе.

Выводы

В работе были исследованы возможности и дана предварительная оценка качества прогноза нейросетевой модели GraphCast для условий Урало-Сибирского региона при ис-

пользовании различных источников инициализации (ICON, ERA5, IFS). Анализ проведён на примере прогноза с заблаговременностью 240 ч, при этом для каждого из источников использовался неизменный набор весов, обученных на данных реанализа ERA5.

Результаты показали, что различия между прогнозами с разной инициализацией на сроках до 132 ч демонстрируют сопоставимое качество. На более поздних этапах прогнозирования расхождения становятся заметнее, особенно для температуры воздуха. Использование данных инициализации от ICON в ряде случаев приводит к снижению ошибок, что более заметно для температуры воздуха на 2 м при оценке качества прогноза для всего Урало-Сибирского региона.

С учётом полученных результатов, дообучение весов, сформированных на основе данных ERA5, представляется перспективным направлением дальнейших исследований в условиях ограниченного объёма данных.

Литература

1. Benjamin S.G., Brown J.M., Brunet G., Lynch P., Saito K., Schlatter T.W. 100 years of progress in forecasting and NWP applications // *Meteor Monogr.* 2018. Vol. 59. P. 13.1–13.67. DOI: 10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-18-0020.1
2. Lopez-Gomez I., McGovern A., Agrawal S., Hickey J. Global extreme heat forecasting using Neural weather models // arXiv:2205.10972 [physics.ao-ph]. 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2205.10972
3. Espeholt L., Agrawal S., Sonderby C., Kumar M., Heek J., Bromberg C., Gazeau C., Carver R., Andrychowicz M., Hickey J., Bell A., Kalchbrenner N. Deep learning for twelve hour precipitation forecasts // *Nature Communications.* 2022. Vol. 13. Article No. 5145. DOI: 10.1038/s41467-022-32483-x
4. Up to £1.2 billion for weather and climate supercomputer // Met Office. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.metoffice.gov.uk/about-us/news-and-media/media-centre/corporate-news/2020/super-computer-funding-2020> (дата обращения: 23.04.25).

5. *McCulloch W.S., Pitts W.* A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity // *Bull. Math. Biophys.* 1943. Vol. 5. P. 115–113. DOI: 10.1007/BF02478259
6. *Hebb D.O.* The Organization of Behavior. New York : Wiley & Sons, 1949.
7. *Rosenblatt F.* Perceptron simulation experiments // *Proceedings of the IRE.* 1960. Vol. 48, No. 3. P. 301–309. DOI: 10.1109/JRPROC.1960.287598
8. *Fukushima K.* Neocognitron: A self-organizing neural network model for a mechanism of pattern recognition unaffected by shift in position // *Biological Cybernetics.* 1980. Vol. 36. P. 193–202. DOI: 10.1007/BF00344251
9. *LeCun Y., Bengio Y.* Convolutional Networks for Images, Speech, and Time-Series // *The Handbook of Brain theory and Neural Networks* / ed. by M.A. Arbib. Cambridge, USA: MIT Press, 1998. P. 255–258. DOI: 10.5555/303568.303704
10. *Романов Л.Н.* Глобальное моделирование погоды (эмпирический подход) // *Sciences of Europe.* 2016. Vol. 1, No. 4 (4). С. 92–99.
11. *Keisler R.* Forecasting global weather with graph neural networks // *arXiv:2202.07575 [physics.ao-ph].* 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2202.07575
12. *Lam R., Sanchez-Gonzalez A., Willson M., Wirsberger P. et al.* GraphCast: Learning skillful medium-range global weather forecasting // *arXiv:2212.12794 [cs.LG].* 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2212.12794
13. ICCARUS 2025 Final Programme // *Deutscher Wetterdienst.* [Электронный ресурс]. URL: https://www.dwd.de/EN/specialusers/research_education/seminar/2025/iccarus2025/final_programme_en.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (дата обращения: 23.04.25).
14. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al.* The ERA5 global reanalysis // *Q. J. R. Meteor. Soc.* 2020. Vol. 146, No. 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803
15. GraphCast: AI model for faster and more accurate global weather forecasting // *DeepMind.* [Электронный ресурс]. URL: <https://deepmind.google/discover/blog/graphcast-ai-model-for-faster-and-more-accurate-global-weather-forecasting/> (дата обращения: 23.04.25).
16. Google-deepmind/graphcast. [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/google-deepmind/graphcast> (дата обращения: 23.04.25).

17. Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4/0 International. [Электронный ресурс]. URL: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> (дата обращения: 23.04.25).
18. *Buizza R., Alonso Balmaseda M., Brown A. et al.* The development and evaluation process followed at ECMWF to upgrade the Integrated Forecasting System (IFS) // ECMWF Technical Memorandum. 2018. No. 829. DOI: 10.21957/xzopnhty9
19. *Giorgetta M., Brokopf R., Crueger T. et al.* ICON-A, the Atmosphere Component of the ICON Earth System Model: Part I. Model Description // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. 2018. Vol. 10, No. 7. P. 1613–1637.

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ
WEB-ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА
ОПЕРАТИВНОЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ
И АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ,
ПОСТУПАЮЩЕЙ В ТЕЛЕГРАММАХ КОДА КН-21**

Л.А. Воронина, К.В. Зуев, М.С. Котов, А.В. Гочаков

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

В рамках выполнения темы Росгидромета НИТР 1.2.5 «Разработка информационной технологии обработки и анализа оперативной метеорологической и агрометеорологической информации, поступающей в коде КН-21 со станций ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС», создана автоматизированная web-технология обработки и анализа оперативной информации, метеорологической и агрометеорологической, поступающей в телеграммах кода КН-21. Технология полностью автоматизирована — от расшифровки телеграмм до формирования приложения декадного Агрометеорологического бюллетеня с визуализацией данных в виде карт, диаграмм, таблиц.

Реализована автоматизированная технология с web-доступом с использованием современных средств разработки (Diango web framework docker, средства мониторинга). Создана процедура обработки, декодирования и представления информации, поступающей в коде КН-21 для всех разделов кода в виде, удобном для использования специалистами агрометеорологами.

Ключевые слова: автоматизированная web-технология, метеорологическая, агрометеорологическая информация, код КН-21

**AUTOMATED WEB-TECHNOLOGY FOR PROCESSING
AND ANALYSIS OF OPERATIONAL METEOROLOGICAL
AND AGROMETEOROLOGICAL INFORMATION RE-
CEIVED IN TELEGRAMS OF THE KN-21 CODE**

L.A. Voronina, K.V. Zuev, M.S. Kotov, A.V. Gochakov

Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute, Novosibirsk

The automated web-technology for processing and analyzing operational meteorological and agrometeorological information received in

telegrams of the KN-21 code was created as a part of the implementation of the Roshydromet science topic 1.2.5 “Development of information technology for processing and analyzing operational meteorological and agrometeorological information received in the KN-21 code from weather stations of West-Siberian Administration for Hydrometeorology and Environmental Monitoring”. The technology is fully automated, from decoding telegrams to forming an application for the ten-day Agrometeorological Bulletin with data visualization in the form of maps, diagrams, and tables.

The automated technology with web access has been implemented using modern software development tools (Diango web framework docker, monitoring tools). A procedure has been created for processing, decoding and presenting information received in the KN-21 code for all sections of the code in a form convenient for use by agrometeorologists.

Keywords: automated web technology, meteorological and agrometeorological information, KN-21 code

Введение

Западная Сибирь является одним из стратегических районов Российской Федерации по выращиванию овощных, зерновых и зернобобовых культур, но в то же время территория Западной Сибири относится к зоне рискованного земледелия. Неблагоприятные агроклиматические условия: резкие перепады температуры воздуха, поздние и ранние заморозки, возникновение засух или, наоборот, переувлажнение почвы, нередко приводят к повреждению, а порой и к гибели сельскохозяйственных культур, осложнению условий сева или уборки урожая [1]. Эти обстоятельства обуславливают устойчивый и даже возрастающий спрос сельхозпроизводителей на своевременную информацию не только об ожидаемых погодных условиях, но и о фактическом распределении температурного фона и количестве выпавших осадков, о влагообеспеченности и теплообеспеченности почвы в период вегетации.

Информация о фактических значениях агрометеорологических характеристик передается в телеграммах в коде КН-21 [2]. Код КН-21 — достаточно сложно сконструированный код,

который предназначен для передачи данных с метеорологических станций и постов по четырем видам агрометеорологической информации: декадной и ежедневной информации по земледельческой зоне и по районам пастбищного животноводства. Приложение к коду содержит специальные шифры для передачи данных:

- наименований сельскохозяйственных культур, дикорастущих растений, сельскохозяйственных угодий с различными системами обработки почв, с различными системами обработки почвы;

- фаз развития сельскохозяйственных культур, трав, дикорастущих древесных и кустарниковых растений;

- повреждений сельскохозяйственных культур;

- сельскохозяйственной работы и агрометеорологических мероприятий.

В настоящее время в центрах по гидрометеорологии (ЦГМС — филиалах ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС») отсутствуют технологии, которые могли бы быстро расшифровывать телеграммы в коде КН-21, обрабатывать полученную информацию и визуализировать ее в формах, приемлемых для размещения в Декадном агрометеорологическом бюллетене: таблицах, диаграммах, картах. В соответствии с заявкой ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» на создание автоматизированной технологии по обработке агрометеорологической и метеорологической информации, поступающей в коде КН-21, в СибНИГМИ было принято решение выполнить поставленную задачу с использованием современных программных средств — web-технологий.

Для решения поставленной заказчиком задачи по созданию полностью автоматизированного процесса от расшифровки телеграмм, поступивших в коде КН-21 в каналы АСПД, до визуализации ее в заявленных формах (таблицах, диаграммах, картах) было решено использовать современный уровень развития процесса обмена данными между различного типа устройствами через Интернет-ресурс [3].

Обработка и анализ метеорологической и агрометеорологической информации из телеграмм кода КН-21

Одной из задач реализации поставленных задач являлось создание структуры выходных данных, полностью описывающей производимые агрометеорологические наблюдения. Был выбран подход разбора и декодирования информации, поступающей в коде КН-21 с помощью инструментария парсинга (Parsing) — автоматизированного сбора и систематизации информации в структурированном виде. Парсинг телеграмм осуществляется по буквенным опознавателям начала и конца сообщения, определяющих признаки передачи декадной (ежедневной) агрометеорологической информации по земельной зоне или по районам пастбищного животноводства, а также эпизодической метеорологической и агрометеорологической информации.

Для организации системы хранения декадной метеорологической и агрометеорологической информации, поступающей в коде КН-21 со станций ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС», разработано программное обеспечение логирования телеграмм с ошибками. Создана интерфейсная часть web-приложения для метеорологической и агрометеорологической ежедневной и декадной информации, поступающей в коде КН-21 со станций Западно-Сибирского УГМС. Для хранения информации базы данных используется система управления базами данных PostgreSQL [3].

Для удобства пользователя разработаны программные средства web-приложения пользовательского интерфейса для отображения разобранных по параметрам из декодированных агрометеорологических телеграмм, поступающих в коде КН-21. Разработка программного обеспечения для создания каркаса web-приложения пользовательского интерфейса осуществлялась с использованием высокоуровневого языка программирования Python [4].

Для визуализации поступившей и обработанной информации в простых табличных формах разработан комплекс про-

грамм для сохранения результатов декодирования телеграмм, поступающих в коде КН-21, в базу данных. Добавлены формы, позволяющие осуществлять поиск записей по индексу станции или дате поступления телеграммы в автоматизированную систему передачи данных (АСПД) Западно-Сибирского УГМС. Добавлена возможность вывода данных на html странице не полным набором, а с разбивкой на части в соответствии с группами кода КН-21 и с возможностью дальнейшего вывода этих групп на отдельные страницы. Созданы таблицы с основными метеорологическими параметрами: температура, влажность воздуха, осадки, ветер.

Разработка программ осуществлялась в соответствии с правилами по написанию кода на Python PEP 8. Особое внимание уделялось описанию структур данных в соответствии с их информационной сущностью, что делает программный код прозрачным для понимания и эффективным в вычислительном смысле. Разработаны программные средства визуализации агрометеорологической информации из телеграмм кода КН-21 в виде таблиц, графиков, карт, и сделана привязка станций к территориальным образованиям: Алтайский край, Республика Алтай, Кемеровская, Новосибирская и Томская области.

Анализируя полученные данные о метеорологическом и агрометеорологическом режиме при подготовке обзоров, справок о сложившихся метеорологических и агрометеорологических условиях, агрометеорологи всегда сравнивают фактические значения со средними многолетними значениями (нормами). В целях получения необходимых данных в автоматизированном режиме, в электронную базу данных были загружены нормы среднедекадных и среднемесячных значений температуры воздуха, а также среднедекадного и среднемесячного количества осадков.

В результате загрузки норм появилась возможность создавать графики, диаграммы, карты с распределением фактических значений температуры воздуха и количества осадков в сравнении с нормами.

Формы таблиц для записи необходимых сведений и параметров из телеграмм кода КН-21 по каждой территории информации разрабатывались в соответствии с техническим заданием агрометеорологов каждого субъекта территории. На рис. 1, 2 приведены примеры таблиц с выбранными из телеграмм кода КН-21 за вторую декаду февраля 2025 г. параметрами температуры воздуха и количества осадков, а также расчетные величины отклонения их от декадной нормы по станциям Новосибирской (рис. 1) и Кемеровской (рис. 2) областей.

Метеорологические сведения за Февраль 2 декаду 2025 года.							
Станция	Температура воздуха, С°				Минимальная температура на поверхности почвы	Осадки, мм	
	Среднедекадная	Отклонение от многолетней	Максимальная	Минимальная		Сумма за декаду	В % к декадной норме
Кыштовка	-10,3	5,9	-1	-25	-28	4,0	57
Северное	-10,2	5,8	-1	-26	-28	6,0	85
Усть-Тарка	-11,0	5,6	-1	-25	-28	3,0	75
Венгерово	-10,5	6,1	-1	-22	-26	4,0	80
Крещенка	-10,7	5,3	-3	-27	-32	6,0	100
Болотное	-9,8	4,3	-1	-22	-32	6,0	66
Чаны	-10,1	5,9	-1	-21	-20	4,0	66
Татарск	-10,2	5,4	0	-21	-24	4,0	66

Рис. 1. Фрагмент таблицы с данными о температуре воздуха и осадков по станциям Новосибирской области

Метеорологические сведения за Февраль 2 декаду 2025 года.									
Станция	Температура воздуха, С°					Осадки, мм			
	Среднедекадная	Отклонение от многолетней	Максимальная	Минимальная	Минимальная температура на поверхности почвы	Сумма за декаду	В % к декадной норме	Сумма с 1.04 по 20.02	
29536 Юрга	-12,0	3,3	-3	-30	-35	8,0	100	0	0
29540 Яя	-10,8	29338 Юрга	0	-28	-35	6,0	150	0	0
29541 Тайга	-10,6	4,1	1	-28	-35	14,0	155	0	0
29548 Барзас	-9,9	4,1	2	-26	-32	16,0	160	0	0
29551 Марининск	-9,4	3,8	-2	-21	-26	3,0	50	0	0
29552 Тажин	-9,3	4,0	2	-21	-30	9,0	128	0	0
29557 Тисуль	-9,6	3,5	-1	-25	-26	3,0	75	0	0
29641 Топки	-8,8	5,1	0	-20	-30	5,0	55	0	0
29644 Промышленная	-10,2	3,8	-3	-23	-30	0,9	15	0	0
29645 Новостройка	-10,7	3,8	-3	-24	-32	7,0	77	0	0
29649 Крапивино	-10,1	3,9	-1	-25	-29	6,0	50	0	0
29654 Центральный Рудник	-8,4	4,5	5	-17	-20	40,0	222	0	0
29741 Красное	-11,6	2,8	-2	-24	-25	2,0	66	0	0
29745 Белово	-9,0	4,0	-2	-20	-22	2,0	33	0	0

Рис. 2. Фрагмент таблицы с данными о температуре воздуха и осадков по станциям Кемеровской области

Метеорологические сведения о высоте снежного покрова и глубине промерзания/оттаивания почвы за Февраль 2 декаду 2025 года.

Средняя высота снежного покрова на										Глубина промерзания почвы, см
Станция	2025				2024					
	Общая лес	Озимые	Травы	Яб, ст, зябь	Общая лес	Озимые	Травы	Яб, ст, зябь		
29536	Юрга	-	-	-	-	17	-	-	-	71
29540	Яя	41	-	-	-	29	-	-	-	42
29541	Тайга	66	-	-	-	50	-	-	-	31
29551	Маринск	28	-	-	-	29	-	-	-	106
29552	Тюжин	32	-	-	-	23	-	-	29551 Маринск	53
29557	Тисуль	12	-	-	-	11	-	-	-	85
29641	Топки	32	-	-	-	28	-	-	-	31
29644	Промышленная	29	-	-	-	32	-	-	-	44
29645	Новостройка	42	-	-	-	37	-	-	-	41
29649	Крапивино	57	-	-	-	44	-	-	-	16
29741	Красное	29	-	-	-	15	-	-	-	128
29745	Белово	28	-	-	-	15	-	-	-	20
29749	Киселевск	24	-	-	-	63	-	-	-	9
29849	Кузедеево	63	-	-	-	57	-	-	-	7

Рис. 3. Фрагмент таблицы с метеорологическими сведениями о высоте снежного покрова и глубине промерзания почвы за вторую декаду февраля 2025 г. по станциям Кемеровской области

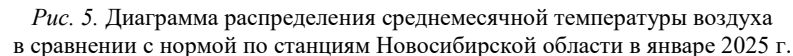
На рис. 3 приведен фрагмент таблицы с метеорологическими сведениями о высоте снежного покрова, глубине промерзания почвы по станциям Кемеровской области за вторую декаду февраля 2025 г. Данные о высоте снежного покрова для сравнения за вторую декаду февраля 2025 г. и вторую декаду февраля 2024 г. позволяют сравнить накопление снеготопливных запасов на текущую дату и включить дополнительную информацию при подготовке справки или обзора. По данным таблицы в 2025 г. высота снега по ряду станций превышает данные в 2024 г., глубина промерзания по многим станциям меньше 50 см, лишь по ряду станции она достигла 70–128 см.

Таблица (рис. 4) содержит информацию о температурном режиме в Томской области с выделением абсолютных максимумов и абсолютных минимумов, отмеченных в течение января 2025 г., и числа дней с минимальной температурой воздуха ниже -20°C .

Для создания диаграмм и графиков подготовлена кодовая база с возможностью выбора декады, месяца, года и территории для построения диаграмм с запрашиваемыми метеороло-

Станция	Максимальная температура воздуха			Минимальная температура воздуха			Минимальная температура на поверхности почвы(снега)			Число дней с максимальной температурой 25°С и более				Число дней с минимальной температурой на поверхности снега -20°С.										
	Декады			Абсолютный максимум			Декады			Абсолютный минимум			Декады			Сумма	Декады			Сумма				
	І	ІІ	ІІІ	І	ІІ	ІІІ	І	ІІ	ІІІ	І	ІІ	ІІІ	І	ІІ	ІІІ		І	ІІ	ІІІ					
13955	Александровское	-1	-2	-1	-1	-22	-21	-37	-37	-27	-28	-40	-40	-	-	-	0	5	4	6	15			
19016	Прохорино	-1	-2	-1	-1	-24	-20	-31	-31	-29	-28	-34	-34	-	-	-	0	4	5	7	16			
19023	Напас	-3	-	-1	-1	-22	-	-29	-29	-27	-	-35	-35	-	-	-	0	2	-	7	9			
19111	Средний Васьонг	-1	-1	0	0	-25	-21	-31	-31	-32	-29	-35	-35	-	-	-	0	4	4	5	13			
19122	Кяргасок	-1	-2	0	0	-28	-25	-30	-30	-35	-31	-34	-35	-	-	-	0	3	5	5	13			
19128	Парабель	0	-2	0	0	-25	-20	-29	-29	-33	-27	-34	-34	-	-	-	0	2	5	5	12			
19149	Степановка	-2	-3	1	1	-21	-21	-27	-27	-29	-24	-35	-35	-	-	-	0	3	2	8	13			
19203	Новый Васьонг	0	-1	-1	0	-21	-22	-30	-30	-30	-30	-34	-34	-	-	-	0	3	4	7	14			
19224	Старича	1	-2	-1	1	-26	-25	-29	-29	-36	-32	-38	-38	-	-	-	0	2	4	7	13			
19231	Коллажеево	0	-2	0	0	-25	-16	-27	-27	-33	-24	-32	-33	-	-	-	0	4	4	7	15			
19237	Подгорное	1	-3	0	1	-18	-19	-25	-25	-30	-28	-29	-30	2021 Коллажеево			-	-	-	0	2	1	6	9
19247	Батурино	1	-3	1	1	-21	-16	-26	-26	-29	-28	-35	-35	-	-	-	0	4	1	7	12			

На рис. 6 приведена диаграмма с распределением количества осадков, выпавших по территории Новосибирской области в январе 2025 г. На фоне экстремального тепла в январе



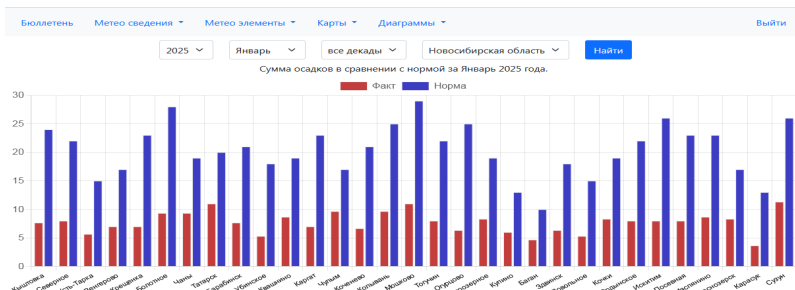


Рис. 6. Диаграмма распределения сумм месячного количества осадков в сравнении с нормой по станциям Новосибирской области в январе 2025 г.

в Новосибирской области отмечался дефицит осадков, выпало 50 % и менее от месячной нормы.

Для создания карт с нанесением метеорологических и агрометеорологических данных из телеграмм кода КН-21 по станциям разных территорий использованы share-файлы с геопривязанными объектами многоугольников для административных субъектов. Эти share-файлы загружены в базу данных с возможностью их замены администратором.

Созданы карты с границами районов территорий, на которых можно нанести значения разных метеорологических и агрометеорологических параметров: температуры воздуха, количества осадков, высоты снежного покрова, глубины промерзания почвы, величины влагозапасов в почве и т.д.

В соответствии с техническим заданием агрометеорологов для каждого элемента при нанесении на карту данных наблюдения (температуры воздуха, количества выпавших осадков и влагозапасов в почве) была подготовлена своя легенда, которая позволяет в цветовой гамме выводить на карту данные из телеграмм. Создавалась схема нанесения числовых характеристик метеорологического и агрометеорологического параметра из кода КН-21, с указанием легенды в виде цветовой шкалы для нанесенного параметра.

На рис. 7–10 приведены примеры карт с нанесением данных по температуре воздуха, количеству выпавших осадков, высоте снежного покрова, глубине промерзания почвы.

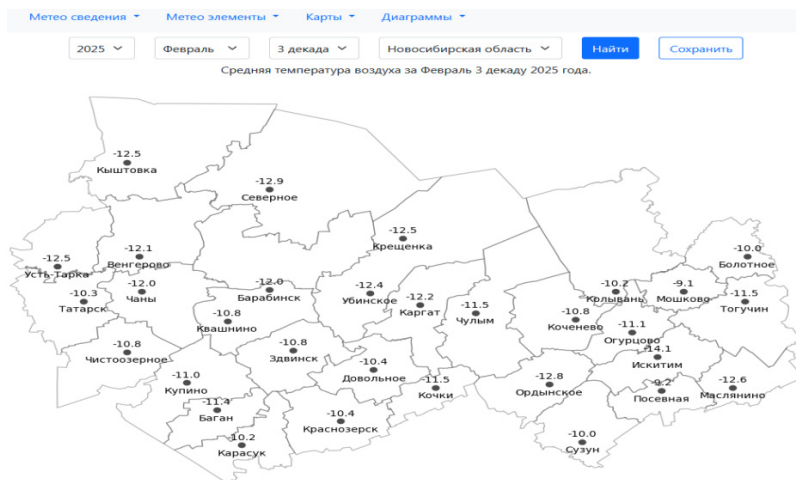


Рис. 7. Средняя температура воздуха за третью декаду февраля 2025 г. по Новосибирской области

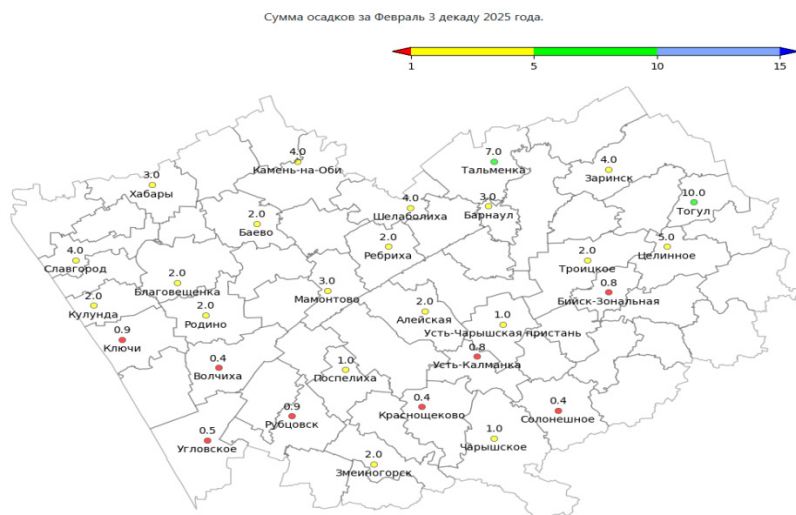


Рис. 8. Сумма осадков за третью декаду февраля 2025 г. по Алтайскому краю

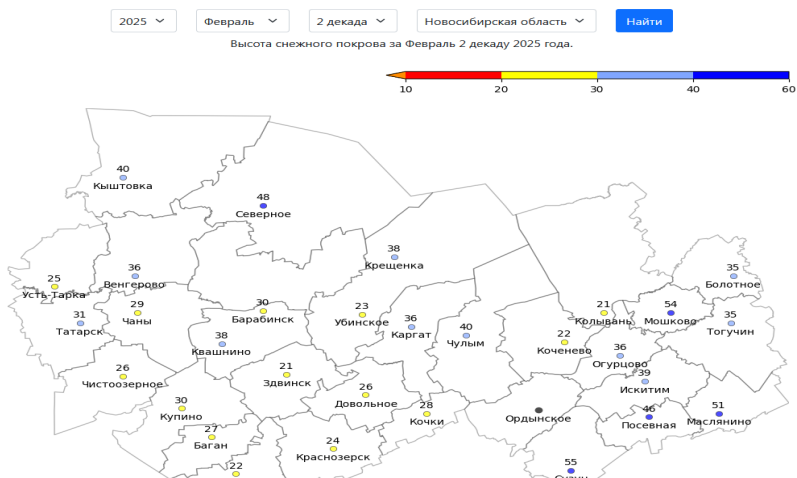


Рис. 9. Высота снежного покрова во второй декаде февраля 2025 г. в Новосибирской области

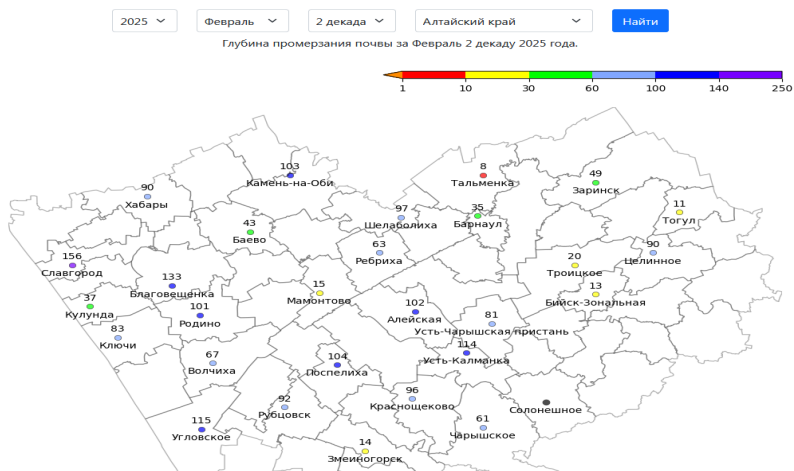


Рис. 10. Глубина промерзания почвы во второй декаде февраля 2025 г. по Алтайскому краю

Агрометеорологический бюллетень

Агрометеорологический бюллетень формируется отдельно для каждой территории Западно-Сибирского УГМС (Новосибирской, Кемеровской, Томской областей, Алтайского края и Республики Алтай) с заявленным набором карт, таблиц и графиков. В декадный бюллетень вставляется Приложение: карты распределения среднедекадной температуры воздуха, декадных сумм осадков, графики отклонения от нормы среднедекадной температуры воздуха и декадного количества осадков по станциям, таблица с основными метеорологическими элементами. Агрометеорологический бюллетень доступен на web-сайте по адресу: <http://agro.sibnigmi.ru>. При вводе логина и пароля пользователь получает доступ к информации, содержащейся в Агрометеорологическом бюллетене. Агрометеорологический бюллетень выпускается подекадно: за первую, вторую и третью декаду месяца. Выпуск Агрометеорологического бюллетеня за третью декаду содержит не только декадную агрометеорологическую информацию, но и информацию за месяц. На рис. 11 показан интерфейс первой страницы

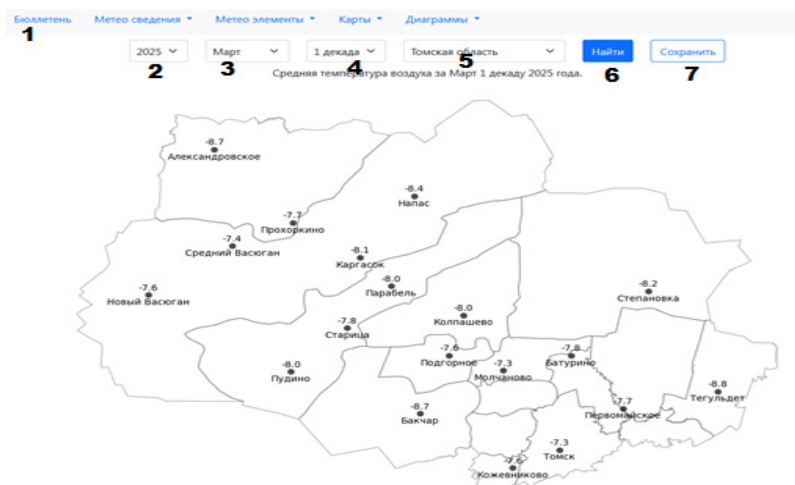


Рис. 11. Интерфейс страницы Декадного агрометеорологического бюллетеня. Средняя температура воздуха за первую декаду марта 2025 г. по Томской области

графического приложения Агрометеорологического бюллетеня. Для просмотра Приложения Агрометеорологического бюллетеня активизируем клавишу 1, затем отмечаем год 2, месяц 3, декаду 4 и территорию 5 (область, край), по которой мы хотим получить обработанную информацию.

После выбора необходимой для просмотра информации нажатием клавиши 6 подтверждаем свой выбор, и высвечивается выборка карт, таблиц и графиков для Приложения декадного Агрометеорологического бюллетеня по запрашиваемой территории. На рис. 12–16 приведен пример заявленной информации для Декадного бюллетеня за первую декаду марта 2025 г. по Томской области.

Для подготовки декадного агрометеорологического бюллетеня с текстовой частью (обзор, анализ) предусмотрен вариант сохранения клавишей 7 «Сохранить» (рис. 11) графической информации: карт, таблиц, диаграмм в формате Word.

Для дополнительного анализа сложившихся агрометеорологических условий, подготовки обзоров технология позволяет просматривать дополнительную метеорологическую и

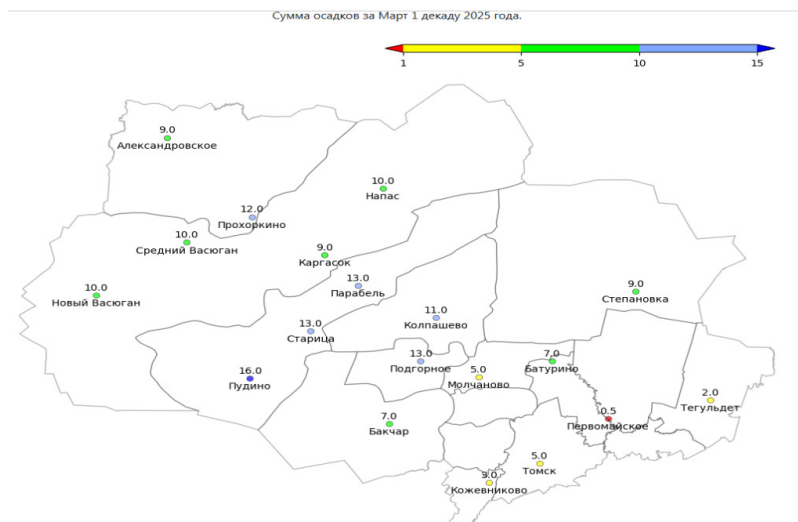


Рис. 12. Сумма осадков за первую декаду 2025 г. по Томской области

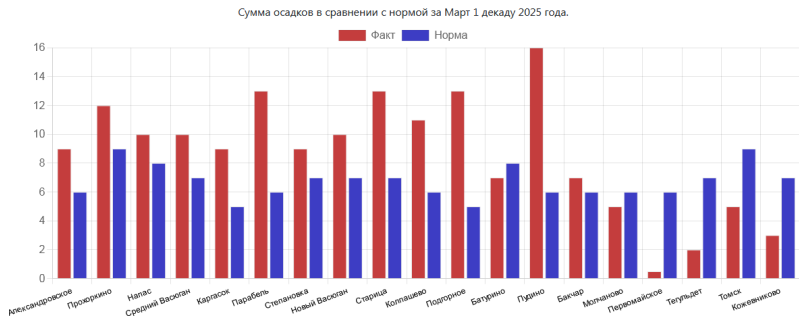


Рис. 13. Диаграмма распределения по станциям Томской области фактического количества осадков и нормы за первую декаду марта 2025 г.

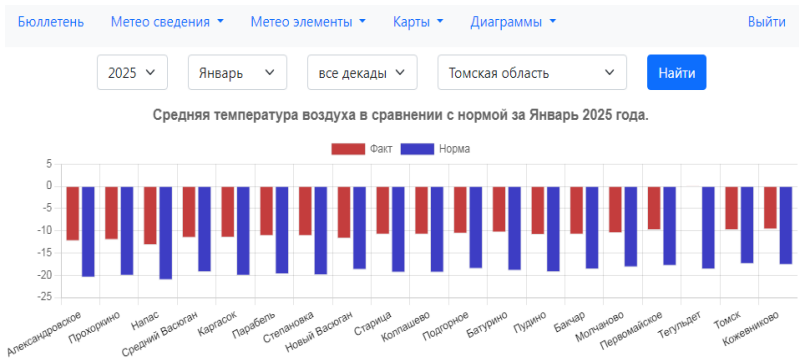


Рис. 14. Диаграмма распределения по станциям Томской области средне-месячной температуры воздуха в сравнении с нормой за январь 2025 г.

Метеорологические сведения за Март 1 декаду 2025 года.

Станция	Температура воздуха, С°				Минимальная температура на поверхности почвы	Осадки, мм		
	Среднедекадная	Отклонение от многолетней	Максимальная	Минимальная		Сумма за декаду	В % к декадной норме	Сумма с 1.04 по 10.03
23955 Александровское	-8,7	3,1	0	-25	-29	9,0	150	0 0
29016 Прохоринское	-7,7	3,2	0	-21	-26	12,0	133	0 0
29023 Налас	-8,4	3,6	0	-28	-34	10,0	125	0 0
29111 Средний Васюган	-7,4	2,8	0	-22	-29	10,0	142	0 0
29122 Карасюк	-8,1	3,6	0	-29	-34	9,0	180	0 0
29128 Парабель	-8,0	3,2	1	-30	-34	13,0	216	0 0
29149 Степановка	-8,2	3,2	-1	-30	-37	9,0	128	0 0
29203 Новый Васюган	-7,6	2,5	1	-26	-32	10,0	142	0 0
29224 Старца	-7,8	2,5	0	-27	-32	13,0	185	0 0
29231 Колташево	-8,0	2,7	0	-29	-33	11,0	183	0 0
29237 Подгорное	-7,6	2,1	1	-25	-30	13,0	260	0 0
29247 Батурино	-7,8	2,7	0	-29	-28	7,0	87	0 0
29313 Пудино	-8,0	2,6	0	-25	-30	16,0	266	0 0
29328 Бакчар	-8,7	2,1	1	-28	-31	7,0	116	0 0

Рис. 15. Фрагмент таблицы с метеорологическими сведениями по станциям Томской области за первую декаду марта 2025 г.

Метеорологические сведения о высоте снежного покрова и глубине промерзания/оттаивания почвы за Март 1 декаду 2025 года.										
Станция		Средняя высота снежного покрова на							Глубина промерзания почвы см	
		2025				2024				
		Общая лес	Озимые	Травы	Яб, ст, зябь	Общая лес	Озимые	Травы		Яб, ст, зябь
29023	Напас	65	-	-	-	67	-	-	-	30
29111	Средний Васюган	52	-	-	-	-	-	-	-	-
29128	Парабель	64	-	-	-	59	-	-	-	26
29149	Степановка	52	-	-	-	59	-	-	-	-
29231	Колпашево	48	-	-	-	53	-	-	-	-
29328	Бакчар	53	29328 Бакчар	-	-	57	-	-	-	39
29332	Молчаново	60	-	-	-	72	-	-	-	69
29348	Первомайское	41	-	-	-	39	-	-	-	63
29430	Томск	54	-	-	-	55	-	-	-	34
29532	Кожевниково	33	-	-	-	39	-	-	-	54

Рис. 16. Фрагмент таблицы с данными о средней высоте снежного покрова и глубине промерзания почвы в первой декаде марта 2025 г. по станциям Томской области

агрометеорологическую информацию, обработанную автоматизированной технологией, кроме информации, помещенной в декадный агрометеорологический бюллетень. На рис. 17 приведен интерфейс возможностей технологии по просмотру дополнительной метеорологической и агрометеорологической информации в форме таблиц, карт, диаграмм, активизируя клавиши 8 (рис. 18), 9 (рис. 19), 10 (рис. 20), 11.

На рис. 18–20 приведены возможности дополнительного просмотра информации.

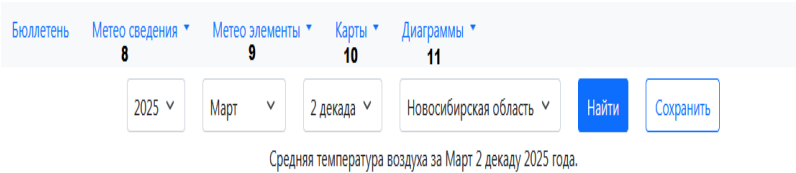


Рис. 17. Интерфейс возможностей технологии просмотра дополнительной информации

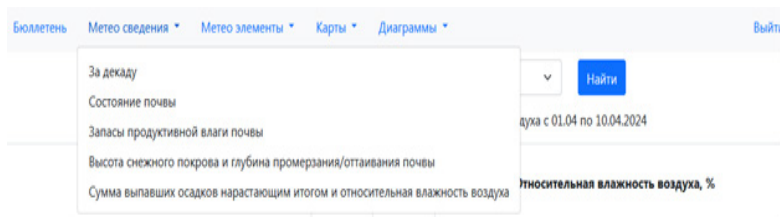


Рис. 18. Возможности просмотра дополнительных метеосведений

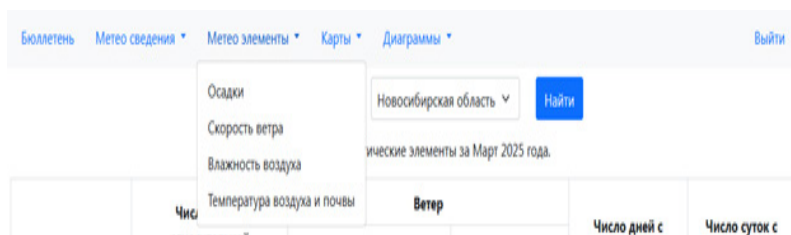


Рис. 19. Возможности просмотра дополнительных метеоэлементов

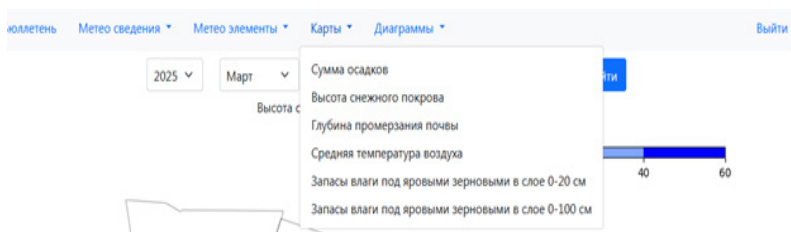


Рис. 20. Просмотр агрометеорологической информации на картах

Заключение

В настоящее время создано довольно много автоматизированных рабочих мест (АРМ) агрометеоролога по раскодировке, контролю и занесению в базу данных декадной и ежедневной метеорологической и агрометеорологической информации, поступающей в телеграммах кода КН-21. Одним из таких является Программный комплекс (ПК) «АРМ-АГРОПРОГНОЗ», разработанный специалистами ВНИИСХМ [5].

В СибНИГМИ разработчиками технологии обработки телеграмм, поступающих в коде КН-21 в АСПД Западно-Сибирского УГМС, было решено использовать современный уровень развития процесса обмена данными между различного типа устройствами через Интернет-ресурсы. Особенностью web-технологий является их специализация, направленная на создание и обеспечение работы онлайн-ресурсов, доступных через сети Интернет [6]. Гибкость и масштабируемость программных решений позволяет любым пользователям, имеющим возможность подключения к сети Интернет и к сети Росгидромета, иметь доступ к метеорологической и агрометеорологической информации, обработанной web-технологией.

Созданные программные комплексы позволяют пользователям в режиме реального времени оценить наличие экстремальности метеорологических, агрометеорологических и климатических параметров, провести анализ обработанной информации, своевременно довести запрашиваемую информацию до государственных органов и других потребителей.

Литература

1. Глобальное изменение климата и Сибирский федеральный округ. На пути к адаптации / Климатический центр Росгидромета. СПб. : Научно-технические технологии, 2021. 12 с.
2. РД 52.27.707-2008. Код для составления декадных и ежедневных агрометеорологических телеграмм КН-21. М. : Росгидромет, 2008. 101 с.
3. Моргунов Е.П. PostgreSQL. Основы языка SQL : учеб. пособие / под ред. Е.В. Рогова, П.В. Лузанова. СПб. : БХВ-Петербург, 2018. 336 с.
4. Лутц М. Изучаем Python. Т. 1. 5-е изд., пер. с англ. СПб. : ООО «Диалектика», 2019. 832 с.
5. РД 52.33.928-2024. Автоматизированное рабочее место — Агрометеорологический прогноз «АРМ-Агропрогноз». Руководство пользователя. Обнинск : ВНИИГМИ-МЦД, 2024. 48 с.
6. Олифер В., Олифер Н. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы : Учебник для вузов. 5-е изд. СПб. : Питер, 2016. 992 с.

СИНОПТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ОСАДКОВ НА ЮГЕ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ И В МОНГОЛИИ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

О.Ю. Антохина¹, П.Н. Антохин¹, А.В. Гочаков^{1,2},
А.А. Збиранник^{1,3}, Т.Ф. Газимов^{2,4}

¹ *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия*

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

³ *Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, Москва*

⁴ *Геолого-географический факультет, Томский государственный
университет, Томск*

Для территории Восточной Сибири и Монголии показано, что в подавляющем большинстве случаев экстремальные (99 процентиль) осадки связаны с прохождением атмосферных фронтов и циклонической деятельностью. Эти синоптические объекты связаны с усилением волновых процессов в средней и верхней тропосфере, приводящих в итоге к сильным циклоническим деформациям поля завихренности, известным как опрокидывания. Циклонические опрокидывания способствуют возникновению и поддержанию блокирования над Восточной Сибирью и Дальним Востоком. Блокирование способствует поддержанию перераспределения осадков и, как следствие, возникновению пожаров в северных районах Сибири и паводков в южных. Анализ синоптических карт демонстрирует увеличение частоты холодных вторжений после 2000-х гг., что, наряду с изменением паттернов давления и меридионального ветра в средней и верхней тропосфере, указывает на изменение волновых процессов, сопутствующих формированию экстремальных осадков в Восточной Сибири и Монголии.

Ключевые слова: экстремальные осадки, атмосферные фронты, циклоны, крупномасштабная циркуляция, блокирующие антициклоны

SYNOPTIC CONDITIONS OF EXTREME PRECIPITATION FORMATION IN THE SOUTH OF EASTERN SIBERIA AND MONGOLIA DURING THE SUMMER PERIOD

O.Yu. Antokhina¹, P.N. Antokhin¹, A.V. Gochakov^{1,2},
A.A.Zbirannik^{1,3}, T.F. Gazimov^{2,4}

¹ Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk

² Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute, Novosibirsk

³ Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation, Moscow

⁴ Faculty of Geology and Geography, Tomsk State University, Tomsk

For the territories of Eastern Siberia and Mongolia, it has been shown that in the overwhelming majority of cases, extreme (99th percentile) precipitation events are associated with the passage of atmospheric fronts and cyclonic activity. These synoptic features are connected with the intensification of wave processes in the middle and upper troposphere, ultimately leading to strong cyclonic deformations of the vorticity field, known as wave breaking events. Cyclonic wave breaking contributes to the formation and maintenance of blocking patterns over Eastern Siberia and the Russian Far East. These blocking patterns promote precipitation redistribution, consequently leading to wildfires in northern Siberian regions and floods in southern areas. Analysis of synoptic maps demonstrates an increase in cold air intrusions after the 2000s, which, along with changes in pressure patterns and meridional winds in the middle and upper troposphere, indicates modifications in the wave processes accompanying the formation of extreme precipitation events in Eastern Siberia and Mongolia.

Keywords: extreme precipitation, atmospheric front, cyclone, large-scale circulation, atmospheric blocking

Введение

Значительный социально-экономический ущерб от наводнений, включая летние паводки, стимулирует разработку методов повышения точности их прогнозирования. В летний период наиболее опасны дождевые паводки, формирующиеся при выпадении сильных ливневых осадков, которые служат основным фактором возникновения катастрофических под-

топлений. В виду ряда факторов территория юга Восточной Сибири (ВС) является одним из наиболее уязвимых регионов России. Сложный рельеф территории, включающий горные хребты и межгорные впадины, способствует накоплению и быстрому стоку воды. В летний период погодные условия в регионе подвержены влиянию летнего муссона Восточной Азии, который приносит на территорию значительное количество влаги, способствуя интенсивным осадкам [1–3]. Согласно предыдущим исследованиям, в условиях изменяющегося климата ожидается увеличение частоты и интенсивности экстремальных осадков на севере Евразии, повышая риски возникновения паводков [4–10]. Это, в свою очередь, подчеркивает актуальность исследования атмосферных процессов, вызывающих экстремальные осадки на юге Восточной Сибири, а также изменений паттернов (пространственных структур) циркуляции атмосферы. Обзор основных условий атмосферной циркуляции, вызывающей сильные осадки на юге ВС и Монголии в летний период, приведен в работах [2, 3]. Исследование проводилось для двух периодов: 1982–1998 и 1999–2019 гг. на основе анализа вертикальной неустойчивости и переносов влаги, связанных с динамикой потенциальной завихренности (PV), позволившего сделать ряд следующих выводов. События с экстремальными осадками характеризуются увеличением неустойчивости тропосферы в районе их выпадения, которая компенсируется стабильностью вокруг этой зоны с усилением переноса влаги из области летнего муссона Восточной Азии. Поле PV в субтропических регионах и средних широтах показывает усиление положительных и отрицательных аномалий PV на юго-востоке и северо-западе от озера Байкал соответственно. Контуры PV для периодов выпадения экстремальных осадков имеют форму циклонического обрушения волн (cyclonic wave breaking (CWB)) и замкнутых отсеченных областей с высокими значениями завихренности (cut-off low). Экстремальные осадки, сопровождающиеся разрушением волн, характеризуются перераспределением областей стабильности и

влажностного содержания. Это может приводить к совместному возникновению наводнений и засух в соседних регионах и в определенной степени является причиной ранее выявленного дипольного режима осадков над Монголией и ВС [1]. Так был продемонстрирован ключевой процесс теории опрокидывания волн в отношении формирования экстремальных осадков. В процессах перемешивания и переноса в средних и высоких широтах ключевую роль играют синоптические вихри. Такие вихри в начальной фазе своего жизненного цикла растут за счет бароклинной неустойчивости и в конечной фазе распадаются баротропно, вызывая зачастую необратимое перемешивание окружающего воздуха. Фаза такого баротропного распада получила название «обрушение волн» [11–13].

В данной работе сделана попытка найти ответы на вопросы, затронутые в [2], но требующие рассмотрения в рамках отдельной работы.

Первой задачей является анализ наиболее типичных синоптических ситуаций, связанных с процессами, описанными в [2], для различных групп осадков, а также выявление различий для двух периодов на синоптических картах. Так, в работе [2] обсуждалось два случая со сходными характеристиками в поле PV (в обоих случаях имело место обрушение волны в районе тропопаузы). Однако наблюдались явные различия в синоптических условиях — первый случай был связан с циклоном, а во втором имел место локальный перегрев в малоградиентном барическом поле.

Как установлено в [2, 3], CWB, напрямую связанные с экстремальными осадками, могут инициировать или усиливать атмосферное блокирование к северу от области выпадения осадков. Поэтому в данной работе анализируется динамика блокирований (до, во время и после выпадения осадков) с целью выявления закономерностей, связанных с блокингами над Восточной Азией. Это важно с точки зрения исследования долгоживущих дипольных структур, обуславливающих природные пожары и экстремальные осадки в соседних регионах

[3]. Кроме того, многие неопределенности в оценках изменения блокингов в будущем связаны с недостаточной изученностью региональных механизмов их формирования [14].

В работе [2] выдвинуто предположение, что в целом для процессов, связанных с выпадением осадков на территории Монголии и на границе Монголии и ВС, становится более характерным явление «сближения» изолиний контуров завихренности для изэнтропических поверхностей 330 и 350 К, характеризующих аномалии умеренных широт и субтропиков соответственно. Так, до 1999 г. преобладали процессы распространения волн вдоль двух волноводов с противоположными знаками аномалий PV в субтропиках и умеренных широтах [2]. В этом случае изолинии на двух поверхностях не совпадают и могут демонстрировать разные конфигурации [2, рис. 6, *a*, *b*]. В период после 1999 г. стали чаще происходить процессы, характеризующиеся аномалиями одного знака. При этом происходит увеличение амплитуды волн с последующим опрокидыванием. Эти результаты согласуются с выявленными тенденциями, указывающими на замедление западного переноса, увеличение амплитуды волн, усиление их стационарности, квазирезонансного усиления, а также увеличение количества опрокидываний в Северном полушарии [15–21]. В целом такие изменения в атмосферной циркуляции могут приводить к увеличению экстремальных осадков.

Таким образом, целью данной работы является исследование типичных синоптических процессов, формирования блокировок и особенностей волновых процессов для событий выпадения экстремальных осадков на юге Восточной Сибири и Монголии в летний сезон, а также их изменений между двумя временными периодами: 1982–1998 и 1999–2019 гг.

Методика и данные

За основу исследования взяты группы экстремальных осадков, полученные в [2] и доступные по ссылке <https://doi.org/10.5281/zenodo.7683621>. Для исследования были использованы

данные осадков GPCC (Global Precipitation Climatology Centre), версии 2020, за период с 1982 по 2019 г. [22]. Экстремальными считались события с суточным количеством выпавших осадков, превышающим значение 99 перцентиля. Анализ проводился для трех основных групп: осадки, выпадающие в Монголии (М), на границе Монголии и ВС (МВС), а также на юге Восточной Сибири (ВС) (рис. 1). Выбор регионов исследования описан в работе [2] и основан на ранее выявленном дипольном режиме колебания осадков и засух между югом ВС и Монголией [1]. Колебания осадков, как показано в работе [1], связаны с особенностями циркуляционного режима, поэтому для исследования этих особенностей целесообразно рассматривать экстремальные события для каждого региона отдельно.

Отдельно были выделены экстремальные осадки продолжительностью один день (индекс 1), а также два и более дней (индекс 2), исходя из предположения, что более длительные экстремальные осадки могут быть связаны с более интенсивными циркуляционными процессами. Таким образом, выделены

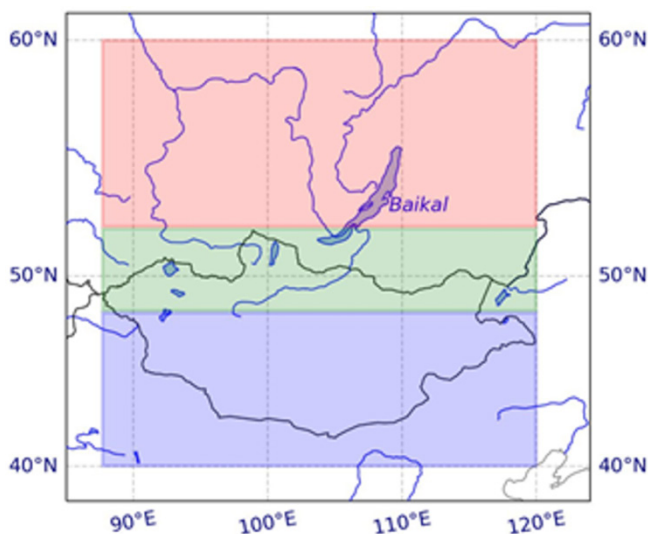


Рис. 1. Регионы исследования, красным — юг Восточной Сибири, зеленым — граница Восточной Сибири и Монголии, синим — Монголия

6 базовых групп, обозначенных как M1, M2, MBC1, MBC2, BC1, BC2. На основании обзора, данного в [2], исследование проводилось отдельно для двух временных интервалов: 1982–1998 и 1999–2019 гг., для сравнения изменения в циркуляционных режимах, вызывающих экстремальные осадки.

Для классификации синоптических ситуаций, сопровождающих экстремальные осадки, был проанализирован архивный синоптический материал, представленный на бумажных носителях. Использовались следующие карты:

- приземные синоптические карты за сроки 00 и 12 UTC (1982–1993 гг.);

- кольцевые карты погоды за каждые 3 ч (1993–1997 гг.);

- синоптические бюллетени с усреднённым положением барических образований и атмосферных фронтов за сутки для всего северного полушария (1998–2019 гг.).

Синоптический анализ выполнялся по каждому событию экстремальных осадков отдельно с оценкой положения барических образований и атмосферных фронтов в районе выпадения осадков. Если событие продолжалось несколько суток, анализ выполнялся для каждого дня в отдельности. На основе визуальной интерпретации карт были выделены 12 типов синоптических ситуаций: 1) циклон; 2) передняя часть циклона; 3) тыловая часть циклона; 4) ложбина циклона; 5) тыловая часть ложбины; 6) слабовыраженная ложбина циклона; 7) малоградиентное барическое поле пониженного давления; 8) тёплый сектор; 9) тёплый фронт; 10) холодный фронт; 11) фронт окклюзии; 12) вторичный холодный фронт.

Для анализа блокирующих процессов в атмосфере были рассчитаны индексы GHGS, используемые в [1]. Результаты расчета представлены в виде долготно-временных диаграмм блокирования и доступны по ссылке: <https://disk.yandex.ru/d/PazVj5o0PNag3w>. На основании полученных диаграмм проводился анализ блокирования в долготной области 80–180° в.д. за пять дней до выпадения осадков, в период выпадения осадков и в течение пяти дней после выпадения осадков. Выбор

временного интервала основан на результатах анализа отдельных событий, который показал наибольшую зависимость осадков и атмосферного блокирования в этом диапазоне [23]. Поскольку для территории Сибири довольно распространен характер блокирования с мерцанием амплитуды [24], для исследования отбирались случаи с продолжительностью блокирования от трех и более суток. Мерцание амплитуды (*amplitude flickering*) — это явление периодического колебания интенсивности атмосферных волн (таких как волны Россби), при котором их амплитуда то усиливается, то ослабевает, но без полного разрушения устойчивой циркуляционной структуры (например, блокирующего антициклона). Для построения диаграмм были использованы данные геопотенциала на уровне 500 гПа из реанализа ERA5 [25].

Для исследования волновых процессов использованы данные реанализа ERA5 о потенциальной завихренности (PV) (формула (1)) на уровнях потенциальной температуры 330 и 350 К. PV — это сохраняющаяся величина в атмосфере, которая характеризует градиент абсолютной завихренности (мера вращения частиц воздуха) вдоль поверхностей с постоянной потенциальной температурой. Карты PV можно использовать для диагностики разных типов волновых процессов в атмосфере [3]:

$$PV = -g \frac{\partial \Theta}{\partial p} (\zeta_{\Theta} + f), \quad (1)$$

где g — гравитационная постоянная; Θ — потенциальная температура; p — давление; ζ_{Θ} — относительная завихренность, перпендикулярная поверхностям потенциальной температуры; f — параметр Кориолиса. Измеряется в единицах завихренности (PVU).

Для анализа условий сближения изолиний завихренности на двух уровнях были использованы карты, полученные в [2] и доступные по ссылке <https://doi.org/10.5281/zenodo.7683717>. В работе [2, рис. 6] рассмотрены аномалии PV на двух уровнях, а также изолинии PV для двух случаев: 7 июля 2001 г. и

9 июля 1994 г. При анализе данных карты отдельно выделены случаи по типу «6–7 июля 2001 г.» — для них характерно вторжение холодного воздуха (положительные аномалии завихренности) вдоль изолиний PV на 350 К. При этом на обоих уровнях обнаруживаются признаки CWB, эти случаи были обозначены как «сдвоенное опрокидывание» и отмечены буквой «W». Наиболее доступными методами исследования волновых процессов [26], помимо использования PV, являются подходы с применением аномалий меридиональной компоненты поля скорости в верхней тропосфере.

В дополнение к полученным ранее композитным картам [1] были построены композитные карты геопотенциала на 500 гПа (z500), температуры воздуха на 850 гПа (t850), а также меридиональной компоненты поля скорости на 250 гПа (v250). Метод композитного анализа широко применяется при анализе событий экстремальных осадков [27]. Композитные усреднения и их достоверность получены аналогично работе [1].

Результаты

1. Анализ синоптических ситуаций, связанных с сильными осадками

В результате анализа синоптического материала было выявлено, что подавляющее большинство наблюдавшихся экстремальных осадков для всех групп по регионам связаны с циклонической деятельностью и атмосферными фронтами — на их долю пришлось 96 % всех случаев. Доля внутримассовых процессов (малоградиентное барическое поле пониженного давления) минимальна и составляет 4 % от общего числа событий. Этот вывод согласуется с предыдущими исследованиями, демонстрирующими доминирующую роль атмосферных фронтов и циклонов в формировании экстремальных осадков умеренных широт [28–30]. Причем эти синоптические объекты тесно связаны с процессами CWB, которые, согласно [31, 32], также вносят существенный вклад в формирование

экстремальных осадков. Отметим некоторые особенности отдельно для каждого выделенного региона.

Для экстремальных осадков на юге Восточной Сибири (группы ВС1 и ВС2) наиболее характерны случаи, связанные с холодным фронтом (30 %) и тыловой частью циклона (18 %) в обоих периодах. При этом доля таких событий увеличивается во втором периоде (1999–2019 гг.) по сравнению с первым (1982–1998 гг.) (рис. 2). На рис. 2 представлена повторяемость случаев сильных осадков, связанных с указанными синоптическими объектами, рассчитанная как доля (в %) от общего числа случаев в каждой из групп. Для двухдневных осадков (ВС2) доля событий, связанных с тыловой частью циклона, увеличилась на 4 %, а с холодным фронтом — на 8 % (рис. 2, б). Для однодневных осадков (ВС1) прирост составил 3 и 18 % соответственно (рис. 2, а).

В приграничной зоне между Монголией и югом Восточной Сибири (группы МВС1 и МВС2) в первом периоде (1982–1998 гг.) наибольшее число экстремальных осадков было связано с барической ложбиной. После 1999 г. их доля значительно снизилась: с 28 до 7 % для двухдневных осадков и с 39 до 28 % — для однодневных. В то же время распределение случаев,

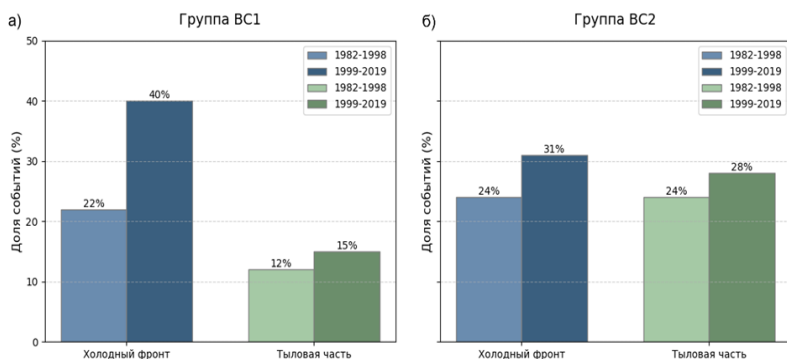


Рис. 2. Процент событий экстремальных осадков, обусловленных холодным фронтом и тыловой частью циклона, для групп ВС1 (а) и ВС2 (б)

связанных с прохождением тёплых и холодных фронтов, не претерпело существенных изменений. В обоих периодах для групп МВС1 и МВС2 наблюдается приблизительно равная доля таких событий: для теплого фронта 13 и 14 % для группы МВС2 и 13 и 8 % для группы МСВС1; для холодного фронта 25 и 21 % для МВС2 и 13 и 11 % для МВС1. Эти результаты позволяют говорить о стабильности влияния атмосферных фронтов на формирование экстремальных осадков в данном регионе.

Для территории Монголии (группы М1 и М2) характерна наиболее высокая повторяемость осадков, связанных с прохождением тёплых фронтов как до (17 %), так и после 1999 г. (24 %). При этом во втором периоде (1999–2019 гг.) зафиксировано снижение доли случаев, связанных с прохождением циклонов: для однодневных событий она уменьшилась с 21 до 7 %. Одновременно с этим увеличилось число осадков, ассоциированных с барической ложбиной, с 24 до 38 %, что может косвенно указывать на изменение траекторий движения циклонов в пределах исследуемой территории.

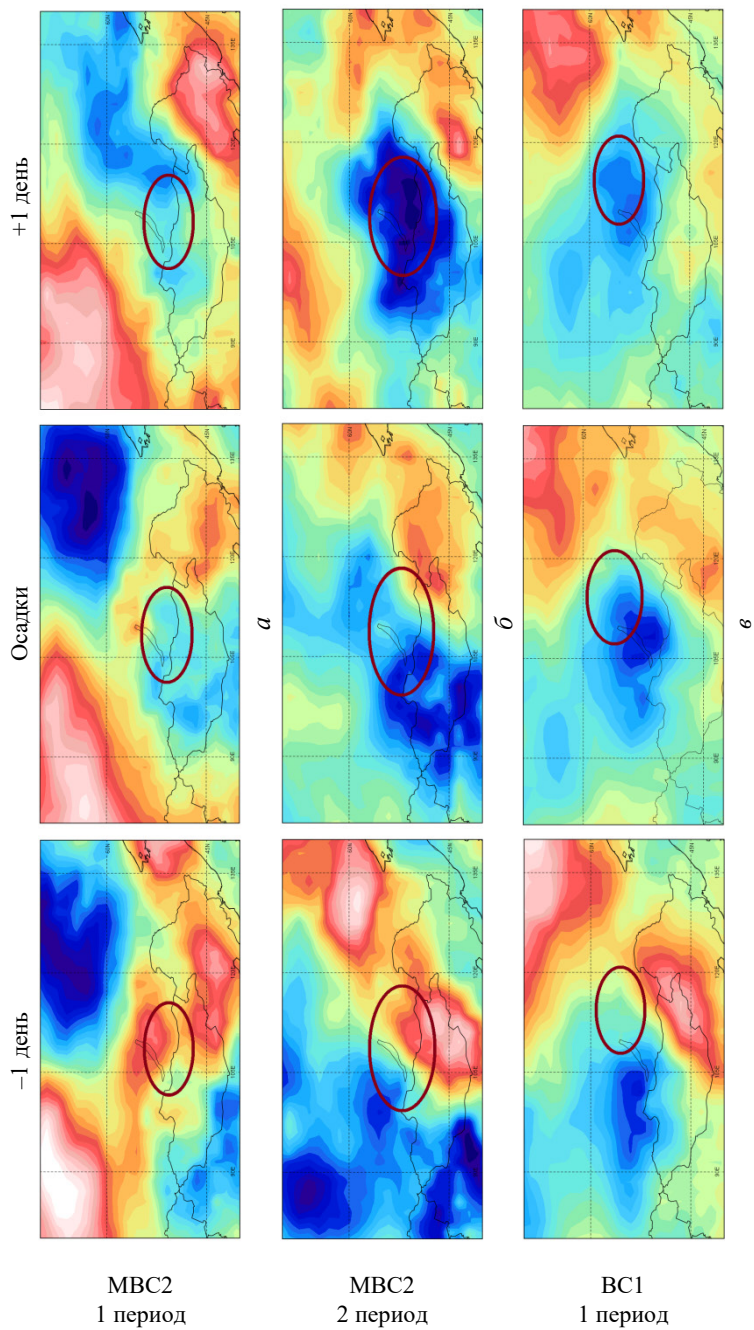
Сведения, полученные при анализе синоптических ситуаций, а также ранее опубликованные результаты показывают, что холодные вторжения на территорию Восточной Сибири стали происходить чаще с начала 2000-х гг. [2]. Для того чтобы выяснить, насколько отличается основной температурный режим для событий экстремальных осадков, были построены композитные карты аномалий температуры воздуха на уровне 850 гПа. На рис. 3 приведены осредненные распределения аномалий температуры для групп МВС2 и ВС1 в день выпадения осадков, а также за день до и после их выпадения. Показано, что для обеих групп во втором периоде характерны более сильные контрасты температур, особенно за счет отрицательных аномалий (рис. 3, *а, б*). Так, аномалии температур в районе выпадения осадков в день и за сутки до события составляли 1–2 К (как в сторону положительных, так и отрицательных аномалий) для группы МВС2 и около 0,5–2 К в сторону отрица-

тельных аномалий для группы ВС1 в период 1982–1998 гг. В то время как во второй период в обеих группах отрицательные аномалии составляли порядка 4 К и более и достигали максимальных значений в день после выпадения осадков. Помимо большей разницы температур, второй период характеризуется большей стационарностью процессов. Для группы ВС1 разница между двумя периодами согласуется с результатами анализа синоптических карт, где было получено увеличение доли событий с прохождением холодного фронта, а следовательно, с вторжениями холодных воздушных масс на территорию юга Восточной Сибири.

2. Блокирование над Сибирью и Дальним Востоком

Как показано в работе [1, рис. 5], значительные контрасты завихренности и, как следствие, температуры на границе двух воздушных масс при усилении волновых процессов могут приводить к возникновению атмосферного блокирования. На рис. 4 приведены композитные карты аномалий геопотенциала на уровне 500 гПа для выделенных групп осадков. Области положительных аномалий геопотенциала в основном сосредоточены в северных районах и характеризуют состояние блокирования западного переноса. Процент событий, связанных с процессами атмосферного блокирования, варьируется для разных групп осадков в разные периоды (табл. 1). Так, для группы осадков МВС2 в первый период только одно событие сопровождается блокингом, что в принципе соответствует усредненной аномалии геопотенциала. В данном случае положительная аномалия почти стационарна и расположена над Западной Сибирью (не участвующей в подсчете блокирований) (рис. 4, б).

Наибольший процент экстремальных осадков, сопровождаемых блокированием, наблюдалась в группе ВС2 в обоих периодах. В первый период доля таких событий составляет 100 %, что соответствует областям положительной аномалии



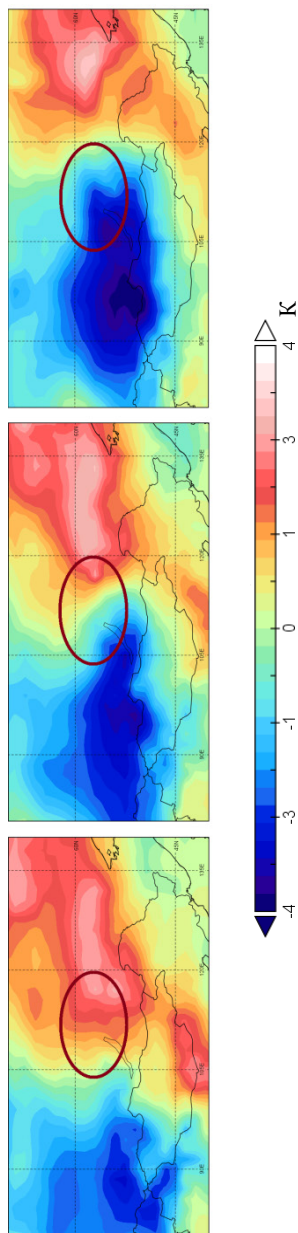
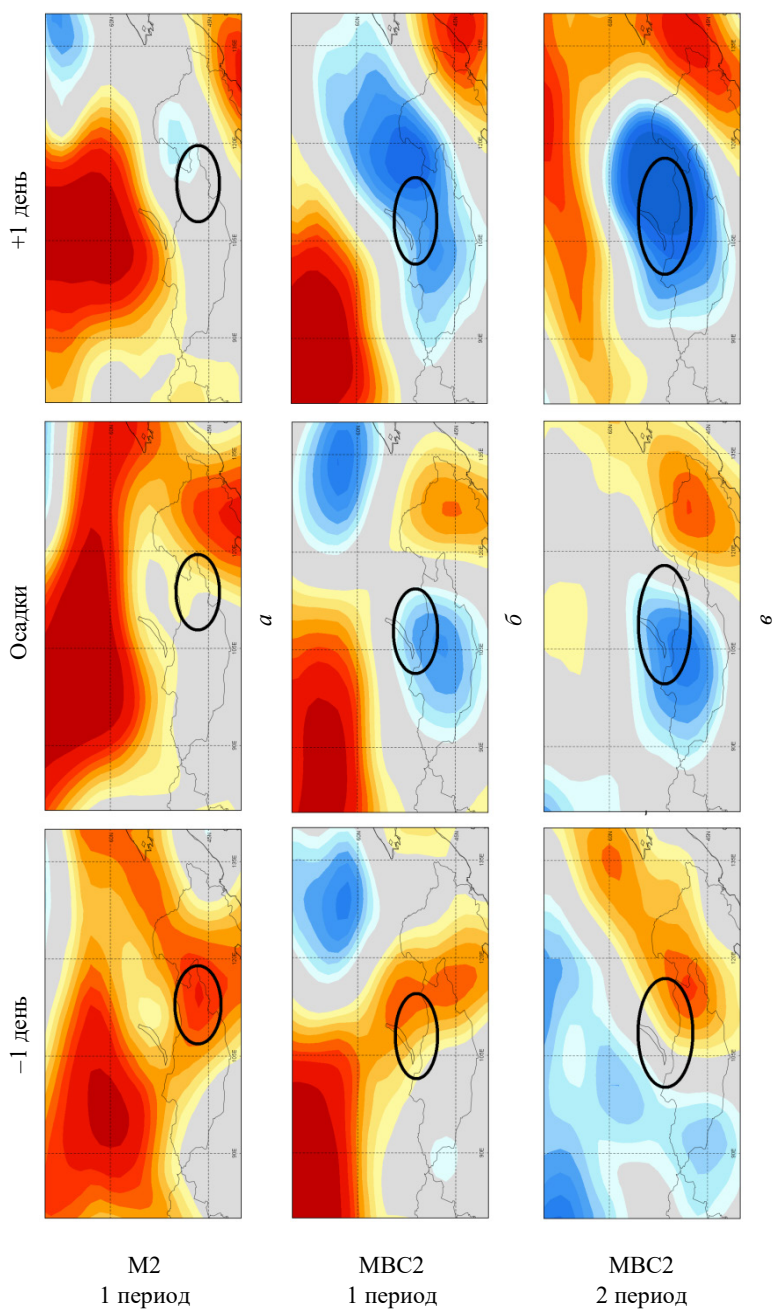


Рис. 3. Композитные карты аномалий температуры воздуха на 850 гПа для групп осадков MBC2 и BC1. Применена процедура удаления тренда, значимые на уровне 95 % аномалии находятся в диапазоне ± 2 К. Коричневым выделены области выпадения осадков

BC1
2 период



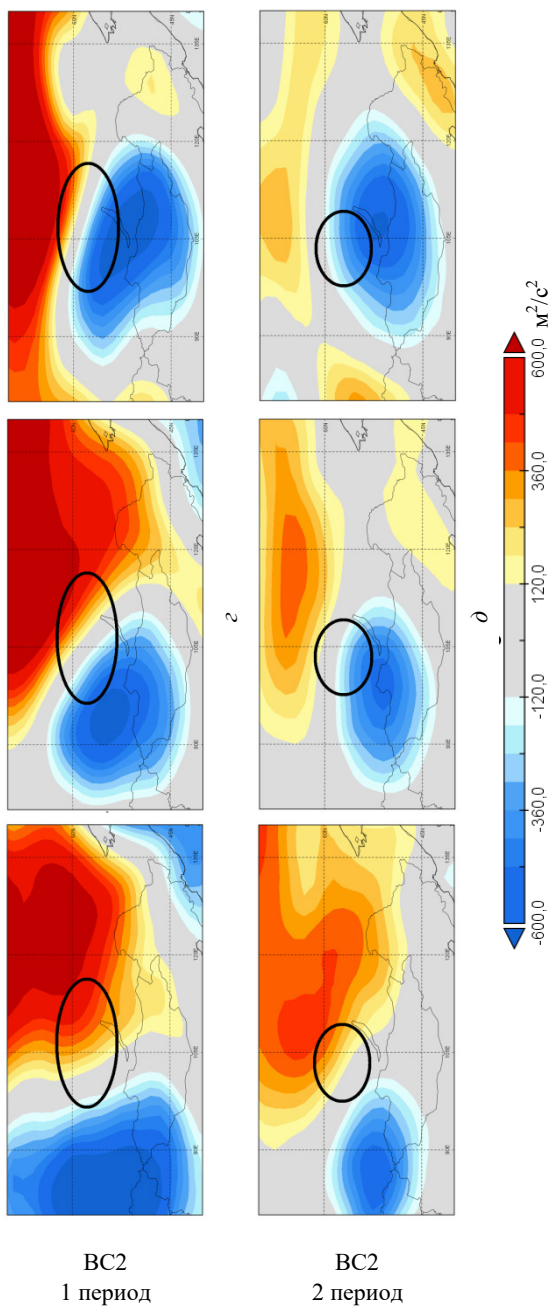


Рис. 4. Композитные карты аномалий геопотенциала на 500 гПа для отдельных групп осадков. Применена процедура удаления тренда, показаны значимые на уровне 95 % аномалии. Черным выделена область выпадения осадков аномалии

геопотенциала в северных и центральных областях Восточной Сибири (рис. 4, з). Как показывают данные табл. 1, чаще всего усиление блокингов происходит в период выпадения осадков и после их выпадения (50 % случаев). Значительное количество случаев блокирования отмечено также для второго периода группы ВС2 (90,9 %), однако, как правило, они наблюдаются чаще до события выпадения осадков (54,6 %), что соответствует наиболее выраженным положительным аномалиям геопотенциала за день до события (рис. 4, д). Следует также отметить, что в группах М1, МВС2, ВС1 во второй период чаще, по сравнению с первым, наблюдается усиление блокирования после выпадения осадков (табл. 1).

Увеличение количества блокирований после событий с сильными осадками согласуется с выявленным усилением вторжений холодного воздуха в южные районы Восточной Сибири,

Таблица 1

Повторяемость атмосферного блокирования (%) над Восточной Сибирью и Дальним Востоком для разных групп выпадения осадков

Группа	Кол-во событий	Процент событий с блокингами	До события	В период события	После события
М2 1982–1998	7	71.43	57.14	28.57	28.57
М1 1982–1998	20	55.00	30.00	20.00	25.00
М1 1999–2019	14	50.00	14.29	7.14	42.86
МВС2 1982–1998	7	14.29	0.00	0.00	14.29
МВС2 1999–2019	9	44.44	0.00	22.22	33.33
МВС1 1982–1998	13	61.54	38.46	23.08	38.46
МВС1 1999–2019	16	75.00	25.00	18.75	50.00
ВС2 1982–1998	6	100.00	16.67	50.00	50.00
ВС2 1999–2019	11	90.91	54.55	27.27	18.18
ВС1 1982–1998	24	54.17	16.67	16.67	29.17
ВС1 1999–2019	27	55.56	18.52	29.63	37.04

которое, согласно [2, 3], может быть связано с усилением волновых процессов в атмосфере.

Наибольшие отличия демонстрируют композиты геопотенциала для групп М2, МВС1 и МВС2. Для первого периода виден стационарный процесс с преобладанием области высокого давления в умеренных широтах к востоку от Байкала, во второй период процессы более сходны с группами ВС1 и ВС2 — к западу от Байкала расположены отрицательные аномалии температуры и геопотенциала, а к востоку — положительные (рис. 4, а–в).

3. Волновые процессы

Для событий с осадками продолжительностью 2 дня и более был проведен анализ конфигурации полей PV. Напомним, что целью было выбрать конфигурации поля завихренности, при которых наблюдается сближение контуров PV субтропиков и умеренных широт и циклоническое опрокидывание и/или отсеченная область высоких значений PV. Результаты приведены в табл. 2, отобранные случаи отмечены как «W» (двойное обрушение/опрокидывание волны).

Согласно данным таблицы, в группах осадков М2 и МВС2 такие события в первом периоде встречаются реже, чем во втором (группа М2 отсутствует полностью во втором периоде): в группе МВС2 43 % для первого периода и 89 % для вто-

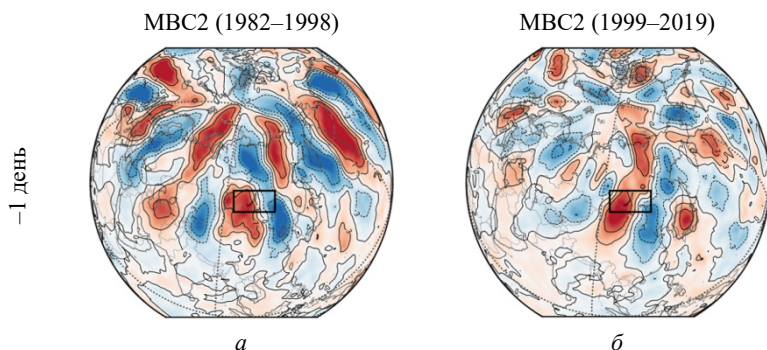
Таблица 2

**События усиления волн по типу «W» для изолиний PV
для двухдневных групп осадков**

	М2	МВС2	МВС2	ВС2	ВС2
Период	1982–1998	1982–1998	1999–2019	1982–1998	1999–2019
Всего событий	7	7	9	6	11
Процент событий с «W» типом (%)	2	3	8	6	9

рого. Для группы ВС2 процентное соотношение между периодами различается незначительно (100 и 82 % соответственно), однако на второй период приходится больше случаев за счет аномального с точки зрения крупномасштабной циркуляции 2019 г. Полученные результаты анализа контуров PV согласуются с результатами работы [1], показывающей особенности конфигурации волноводов до и после 2000 г. Для раннего периода волноводы субтропиков и умеренных широт над Азией характеризуются чередованием знаков с разными фазами, так если над субтропиками расположена отрицательная аномалия PV, то в умеренных широтах будет локализована положительная. События сильных осадков в этот период в большей степени были ассоциированы с субтропическим волноводом.

Для того чтобы продемонстрировать особенности волновых процессов и их изменения, на рис. 5 приведены композитные усреднения меридиональной компоненты скорости на уровне 250 гПа для группы осадков МВС2. Показано, что для обоих периодов как до момента выпадения осадков, так и после наблюдается четкая знакопеременная картина (рис. 5, *a, б, д, e*). Основное различие заключается в том, что в первый период до выпадения осадков в субтропиках наблюдается более четко выраженный процесс, характеризующийся более значительными аномалиями противоположных знаков над территорией Евразии. Такое распределение аномалий сохраняется и после выпадения осадков (рис. 5, *a, д*).



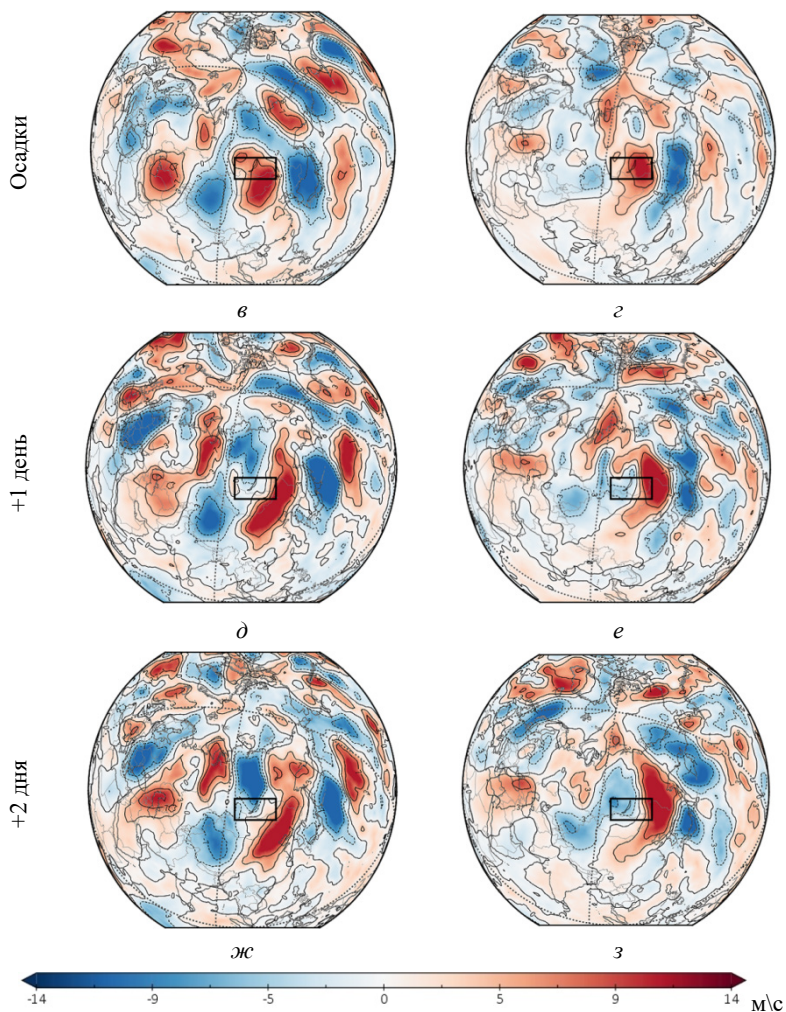


Рис. 5. Композитные карты аномалий меридиональной компоненты поля скорости на 250 гПа для группы осадков МВС2 для периодов 1982–1998 (слева) и 1999–2019 гг. (справа). Применена процедура удаления тренда, значимые на уровне 95 % аномалии находятся в диапазоне ± 3 м/с.

Прямоугольником выделены области осадков

Для второго периода знаки аномалий в умеренных широтах и тропиках одинаковы и максимумы существенно смещены в умеренные широты (рис. 5, б, з). После выпадения осадков

можно видеть, что происходит полное перемещение аномалий поля скорости в более высокие широты, где происходит значительный рост амплитуды волн (рис. 5, *е, з*). Эти различия в свою очередь подчеркивают, что осадки в группе МВС2 в разные периоды, вероятно, связаны с разными волновыми процессами, с усилением аномалий в более высоких широтах во второй период. Как показано в работе [1], второй процесс менее продуктивен с точки зрения выпадения осадков к юго-востоку от Байкала.

Заключение

В работе исследованы синоптические условия и особенности крупномасштабной циркуляции атмосферы, такие как волновые процессы и атмосферное блокирование, связанные с экстремальными осадками на юге Восточной Сибири и Монголии в летний сезон. Для исследования и сравнительного анализа были выбраны два периода: 1982–1998 и 1999–2019 гг. Согласно полученным результатам, доминирующими процессами, обуславливающими экстремальные осадки в изучаемом регионе, являлись циклогенез, прохождение атмосферных фронтов и вторжение холодных воздушных масс. Детальный синоптический анализ показал существенные различия для разных групп осадков для двух периодов до и после 1999 г. Так, сильные осадки на территории Монголии в основном были ассоциированы с прохождением теплого фронта, однако после 1999 г. циклоническая активность в регионе снизилась. Экстремальные осадки на юге Восточной Сибири во второй период, напротив, чаще связаны с тыловой частью циклона и холодным фронтом. При этом во второй период стало чаще наблюдаться формирование и усиление атмосферного блокирования над районами Восточной Сибири после события выпадения сильных осадков. Снижение циклонической активности над Монголией и большая распространенность блокирующих явлений на юге Восточной Сибири согласуются с тенденциями снижения бароклинности и повышения стационарности

в Северном полушарии [17, 21]. Эти изменения свидетельствуют о более широком изменении структуры атмосферной циркуляции, потенциально связанной с воздействием изменения климата на динамику крупномасштабных волн и струйных течений.

Анализ крупномасштабной циркуляции демонстрирует увеличение частоты блокирующих явлений и усиление волновой активности после 1999 г. Также был выявлен сдвиг в волновых процессах с более выраженным разрушением волны и повышенной стационарностью во втором периоде. Комплексный анализ полей потенциальной завихренности показал увеличение частоты циклонического типа обрушения волн (CWB) и формирование отсеченных областей высокой завихренности, особенно для групп осадков MBC2 и BC2, что может свидетельствовать об интенсификации волновых процессов в более высоких широтах во второй период. Вероятно, изменения в процессах крупномасштабной циркуляции, в частности более частые вторжения холодного воздуха и возникновения блокирований, ответственны за наблюдаемые различия в характере выпадения осадков для двух рассматриваемых периодов.

Результаты данного исследования дают важное представление об изменении природы экстремальных осадков на юге Восточной Сибири и в Монголии, обусловленных крупномасштабной динамикой атмосферы. Результаты согласуются с предыдущими исследованиями, например [1, 31, 32], показывающими, что интенсификация волновых процессов, особенно CWB, играет значительную роль в возникновении экстремальных осадков в средних широтах.

Однако по-прежнему существует неопределенность в отношении точных механизмов, определяющих эти изменения. Аномальный 2019 год, отмеченный рекордно высокой частотой блокирующих событий [3], свидетельствует о том, что необходимы дальнейшие исследования для определения роли краткосрочной климатической изменчивости в формировании

этих закономерностей. Кроме того, различия в конфигурациях крупномасштабных атмосферных волн после 2000 г. и их влияние на экстремальные осадки в регионе исследования, описанные в [1], требуют дальнейшего детального изучения.

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00167, <https://rscf.ru/project/23-27-00167/>

Литература

1. *Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Martynova Y.V., Mordvinov V.I.* The linkage of the precipitation in the Selenga river basin to midsummer atmospheric blocking // *Atmosphere*. 2019. Vol. 10, No. 6. P. 343. DOI: 10.3390/atmos10060343
2. *Antokhina O., Antokhin P., Gochakov A., Zbirannik A., Gazimov T.* Atmospheric circulation patterns associated with extreme precipitation events in Eastern Siberia and Mongolia // *Atmosphere*. 2023. Vol. 14, No. 3. P. 480. DOI: 10.3390/atmos14030480
3. *Antokhina O., Antokhin P.N., Belan B.D., Gochakov A.V., Martynova Y.V., Pustovalov K.N., Tarabukina L.D., Devyatova E.V.* Effects of Rossby waves breaking and atmospheric blocking formation on the extreme forest fire and floods in Eastern Siberia 2019 // *Fire*. 2023. Vol. 6, No. 3. P. 122. DOI: 10.3390/fire6030122
4. *Школьник И.М., Мелешко В.П., Ефимов С.В., Стафеева Е.Н.* Изменения экстремальности климата на территории Сибири к середине XXI века: ансамблевый прогноз по региональной модели ГГО // *Метеорология и гидрология*. 2012. № 2. С. 5–23.
5. *Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O., Bulygina O., Mokhov I.I., Semenov V.A.* Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades // *Environ Res. Lett.* 2019. Vol. 14, No. 4. P. 045001. DOI: 10.1088/1748-9326/aafb82
6. *Groisman P., Shugart H., Kicklighter D. et al.* Northern Eurasia Future Initiative (NEFI): Facing the challenges and pathways of global change in the twenty-first century // *Progress in Earth and Planetary Science*. 2017. Vol. 4. Article number 41. DOI: 10.1186/s40645-017-0154-5
7. *Zolotokrylin A., Cherenkova E.* Seasonal changes in precipitation extremes in Russia for the last several decades and their impact on vi-

- tal activities of the human population // *Geography, Environment, Sustainability*. 2017. Vol. 10, No. 4. P. 69–82. DOI: 10.24057/2071-9388-2017-10-4-69-82
8. *Tabari H.* Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. Article number 13768. DOI: 10.1038/s41598-020-70816-2
9. *Харюткина Е.В., Логинов С.В., Морару Е.И., Пустовалов К.Н., Мартынова Ю.В.* Динамика характеристик экстремальности климата и тенденции опасных метеорологических явлений на территории Западной Сибири // *Оптика атмосферы и океана*. 2022. Т. 35, № 2 (397). С. 136–142. DOI: 10.15372/AOO20220208
10. *Watanabe T., Matsuyama H., Kuzhevskaya I., Nepochurenko O., Chursin V., Zemtsov V.* Long-term trends of extreme climate indexes in the Southern part of Siberia in comparison with those of surrounding regions // *Atmosphere. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 2023. Vol. 14, No. 7. P. 1131–1131. DOI: 10.3390/atmos14071131
11. *McIntyre M.E., Palmer T.N.* Breaking planetary waves in the stratosphere // *Nature*. 1983. Vol. 305, No. 5935. P. 593–600. DOI: 10.1038/305593a0
12. *Thorncroft C.D., Hoskins B.J., McIntyre M.E.* Two paradigms of baroclinic-wave life-cycle behaviour // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 1993. Vol. 119, No. 509. P. 17–55. DOI: 10.1002/qj.49711950903
13. *Krupchatnikov V.N., Borovko I.V.* Rossby wave breaking and blocking events associated with some atmospheric circulation regimes in the Northern Hemisphere based on a climate system model (PlaSim-ICMMG-1.0) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 611. P. 012015. DOI: 10.1088/1755-1315/611/1/012015
14. *Woollings T., Barriopedro D., Methven J., Son S.W., Martius O., Harvey B., Sillmann J., Lupo A.R., Seneviratne S.* Blocking and its response to climate change // *Current Climate Change Reports*. 2018. Vol. 4, No. 3. P. 287–300. DOI: 10.1007/s40641-018-0108-z
15. *Francis J.A., Vavrus S.J.* Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes // *Geophys. Res. Lett.* 2012. Vol. 39, No. 6. DOI: 10.1029/2012GL051000
16. *Petoukhov V., Rahmstorf S., Petri S., Schellnhuber H.J.* Quasiresonant amplification of planetary waves and recent Northern Hemisphere weather extremes // *Proc. Natl Acad. Sci.* 2013. Vol. 110, No. 14. P. 5336–5341. DOI: 10.1073/pnas.1222000110
17. *Coumou D., Petoukhov V., Rahmstorf S., Petri S., Schellnhuber H.J.* Quasi-resonant circulation regimes and hemispheric synchronization

- of extreme weather in boreal summer // *Proc. Natl Acad. Sci.* 2014. Vol. 111, No. 34. P. 12331–12336. DOI: 10.1073/pnas.1412797111
18. *Coumou D., Kornhuber K., Lehmann J., Petoukhov V.* Weakened flow, persistent circulation, and prolonged weather extremes in boreal summer // *Climate Extremes*. 2017. P. 61–73. DOI: 10.1002/9781119068020.ch4
 19. *Gochakov A.V., Antokhina O.Yu., Krupchatnikov V.N., Martynova Yu.V.* Long-term variability of Rossby wave breaking in the subtropical jet stream area // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2022. Vol. 47, No. 2. P. 79–88. DOI: 10.3103/s1068373922020017
 20. *Dong B., Sutton R.T., Shaffrey L., Harvey B.* Recent decadal weakening of the summer Eurasian westerly jet attributable to anthropogenic aerosol emissions // *Nature Communications*. 2022. Vol. 13, No. 1. P. 1148. DOI: 10.1038/s41467-022-28816-5
 21. *Zhang J., Liu J.* Response of extreme precipitation to increasing extratropical cyclonic vortex frequency // *Atmos. Ocean Sci. Lett.* 2022. Vol. 15, No. 15. P. 100208–100208. DOI: 10.1016/j.aosl.2022.100208
 22. *Schneider U., Finger P., Meyer-Christoffler A., Rustemeier E., Ziese M., Becker A.* Evaluating the hydrological cycle over land using the newly-corrected precipitation climatology from the Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) // *Atmosphere*. 2017. Vol. 8, No. 12. P. 52. DOI: 10.3390/atmos8030052
 23. *Збираник А.А., Антохина О.Ю., Антохин П.Н.* Особенности потока волновой энергии над Евразией перед событиями выпадения экстремальных осадков в июле 2010 года на юге Восточной Сибири // *Атмосферная радиация и динамика (МСАРД-2023): Сборник трудов Международного симпозиума*. 2023. С. 223–227.
 24. *Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Девятова Е.В., Мартынова Ю.В.* Атмосферные блокинги в Западной Сибири. Часть 2. Долговременные вариации повторяемости ситуаций блокирования и их связь с изменением климата в Азии // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 3. С. 16–28.
 25. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J. et al.* The ERA5 global reanalysis // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2020. Vol. 146, No. 730. DOI: 10.1002/qj.3803
 26. *Wirth V., Riemer M., Chang E.K.M., Martius O.* Rossby wave packets on the midlatitude waveguide—A review // *Monthly Weather Re-*

- view. 2018. Vol. 146, No. 7. P. 1965–2001. DOI: 10.1175/mwr-d-16-0483.1
27. Barlow M. Gutowski W.J., Gyakum J.R., Katz R.W., Lim Y.K., Schumacher R.S. et al. North American extreme precipitation events and related large-scale meteorological patterns: A review of statistical methods, dynamics, modeling, and trends // *Climate Dynamics*. 2019. Vol. 53, No. 11. P. 6835–6875. DOI: 10.1007/s00382-019-04958-z
28. Catto J.L., Pfahl S. The importance of fronts for extreme precipitation // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2013. Vol. 118, No. 19. P. 10, 791–710, 801. DOI: 10.1002/jgrd.50852
29. Pfahl S., Wernli H. Quantifying the relevance of cyclones for precipitation extremes // *Journal of Climate*. 2012. Vol. 25, No. 19. P. 6770–6780. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00705.1
30. Pfahl S., O’Gorman P.A., Fischer E.M. Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation // *Nat. Clim. Change*. 2017. Vol. 7, No. 6. P. 423–427. DOI: 10.1038/nclimate3287
31. de Vries A.J. A global climatological perspective on the importance of Rossby wave breaking and intense moisture transport for extreme precipitation events // *Weather Clim. Dyn.* 2021. Vol. 2, No. 1. P. 129–161. DOI: 10.5194/wcd-2-129-2021
32. Акперов М.Г., Мохов И.И. Изменения циклонической активности и осадков в атмосфере внетропических широт Северного полушария в последние десятилетия по данным реанализа ERA5 // *Оптика атмосферы и океана*. 2023. Т. 36, № 5. С. 377–380. DOI: 10.15372/AOO20230507

ОБЩИЕ ЧЕРТЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИСПАРЕНИЯ СО СНЕЖНОГО ПОКРОВА В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ

И.Л. Калюжный¹, И.И. Василевич², Н.Л. Секисов²

¹ Государственный гидрологический институт (ФГБУ «ГГИ»),
Санкт-Петербург

² Арктический и антарктический научно-исследовательский институт
(ГНЦ РФ «АНИИ»), Санкт-Петербург

Приведены результаты инструментальных наблюдений за испарением с поверхности снежного покрова на арх. Шпицберген (2021–2024 гг.) и арх. Северная Земля (2024 г.). Показано, что в районе НИС «Мыс Баранова» в апреле среднесуточная величина испарения равна $-0,01$ мм/сут., в предвесенний период $0,23$ мм/сут. В мае увеличивается до $0,29$ мм/сут и при снеготаянии в июне составляет $0,42$ мм/сут. Пропуски в наблюдениях ликвидируются путем применения модели $E_c = f(D, U)$, полуэмпирическим методом, линейной экстраполяцией и методом П.П. Кузьмина. Установлено, что за зимний сезон в районе поселка Баренцбург с поверхности снега испарилось $35,6$ мм влаги, в районе НИС «Мыс Баранова» — $18,15$ мм.

Ключевые слова: испарение, сублимация, снежный покров, методы измерения и расчета, Арктика

GENERAL CHARACTERISTICS OF SUBLIMATION FROM SNOW COVER IN THE ARCTIC

I.L. Kalyuzhny¹, I.I. Vasilevich², N.L. Sekisov¹

¹ State Hydrological Institute, Saint Petersburg

² Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg

The results of instrumental observations of sublimation from the snow cover surface on Spitsbergen Archipelago (2021–2024) and Severnaya Zemlya Archipelago (2024) are presented. It is shown that at Cape Baranov weather station, in April, the average daily sublimation rate is -0.01 mm/day, while during the pre-spring period it reaches 0.23 mm/day. In May, this value increases to 0.29 mm/day, and during snowmelt in

June, it amounts to 0.42 mm/day. Data gaps were eliminated using the $E_C = f(D, U)$ model, semi-empirical method, linear extrapolation, and Kuzmin's method. It was found that over the winter season, 35.6 mm of moisture sublimated from the snow in the Barentsburg weather station area, while in the Cape Baranov station area, this figure was 18.15 mm.

Keywords: sublimation, snow cover, measurement methods, calculation methods, Arctic

Введение

Снежный покров является определяющей особенностью Арктического региона России. Он обладает большой пространственной и временной изменчивостью, обусловленной воздействием ряда климатических и гидрометеорологических факторов. Одним из этих факторов являются потери влаги на испарение.

На территории СССР массовое определение испарения со снега инструментальным путем в системе Гидрометслужбы было начато во второй половине XX века. Анализ пространственного распределения величин испарения, выполненный В.И. Кузнецовым [1], показал, что на большей территории страны его суммарная величина лежит в пределах 5–10 мм за зимний сезон, в отдельных случаях увеличивается до 15 мм. Испарение со снежного покрова (СП) в Арктике им не рассматривалось.

Существенные потери влаги на испарение со снега наблюдаются в южных регионах, на полях, где снег может испаряться ещё до наступления весеннего снеготаяния [2]. При солёном снеготаянии солнечная радиация, проникая в снег при отрицательных температурах воздуха, вызывает оплавление снежинок, что приводит к явлению парникового эффекта. В результате снежный покров толщиной 15–20 см испаряется при температурах от 0 до -10°C . Недоучет потерь влаги на испарение приводит к погрешностям при оценке запасов воды в снежном покрове и в дальнейшем оказывает влияние на принятие

различного уровня научных, экологических и экономических решений.

Модельные оценки испарения в Арктике показали, что для равнинных территорий испарение может составлять от 10 до 50 % [3] от объема осадков за холодный период, для горных районов — 10–90 % [4]. Результаты метеорологических наблюдений в западной части Новой Земли позволили А.С. Постникову [5] на основе расчета определить годовую величину испарения в этом районе, близкую к 50 мм. Сотрудниками ААНИИ в 2021–2024 гг. получены первые результаты инструментальных наблюдений за испарением со снежного покрова в Арктике, в районе арх. Шпицберген, приведенные в работе [6]. В 2024 г. были проведены аналогичные наблюдения за испарением на научно-исследовательской станции «Ледовая База “Мыс Баранова”».

Целью работы является обобщение результатов исследований и определение закономерностей формирования процесса испарения (сублимации) в арктических условиях.

Объекты и методика производства наблюдений за испарением со снежного покрова в условиях Арктики

Учитывая определенные различия в климатических зонах Арктики, в качестве объектов для инструментальных определений испарения со снежного покрова, были выбраны следующие объекты:

- арх. Шпицберген, метеорологическая станция поселка Баренцбург (N 78,05863° E 14,22088°);
- арх. Северная Земля, район метеорологической станции Мыс Баранова (N 79,02833° E 101,06167°).

Наблюдения производились на специально оборудованных снегоиспарительных площадках размером 10 × 10 м каждая.

На о. Западный Шпицберген площадка располагалась на пологом склоне, вблизи метеорологической станции п. Баренцбург, на высоте 75 м. На арх. Северная Земля — на очень пологом склоне, на расстоянии 485 м от метеорологической станции

Мыс Баранова. Высота станции над уровнем моря не превышает 13 м.

На каждой площадке были установлены по два испарителя ГГИ-500-6 для определения испарения со снега, термометры ТМ-03, снегомерные рейки М-46 и снегозащитные будки для взвешивания испарителей морозоустойчивыми весами Ohaus Valor V71P30T или M-ER 326AFU-15.1. На рис. 1 приведена снегоиспарительная площадка в районе метеорологической станции Мыс Баранова. От легкой поземки площадка с испарителями защищена капроновой сеткой с ячейками $1,5 \times 1,5$ мм и высотой 3–4 см. Высота защиты не должна превышать 7,0 см [7].

Взвешиваемый снеговой испаритель ГГИ-500-6 с площадью испаряющей поверхности 500 см^2 и высотой корпуса 6 см является основным прибором для определения испарения со снега в системе Росгидромета [8]. Не останавливаясь



Рис. 1. Снегоиспарительная площадка с испарителями ГГИ-500-6, защищенная капроновой сеткой, и электронный термометр для измерения температуры поверхности снега

на конструкции приборов, укажем, что взвешивание приборов производят два раза в сутки — в 8:00 (ночной период) и 20:00 (дневной период). Величину испарения определяют по разности массы испарителя в начале и в конце опыта с учетом выпавших осадков. Суточная величина испарения определяется как среднее из показаний двух испарителей. Время экспозиции приборов для каждого полусуток составляет 12 ч.

Применение двух испарителей позволяет повысить надежность измерений. Оценка коэффициента корреляции парных измерений, выполненная на основе наблюдений на метеорологической станции Баренцбург, показывает, что в зимний и предвесенний периоды он равен 0,894 и понижается весной до 0,664. Парный коэффициент корреляции на метеорологической станции Баранова — 0,897.

Производство работ по определению испарения со снежного покрова в системе Росгидромета регламентированы Методическими рекомендациями [8].

Анализ первичных результатов наблюдений за испарением со снежного покрова

В районе метеорологической станции Баренцбург инструментальные наблюдения за испарением проводились с 2021 по 2024 г., охватывая при этом предвесенний и весенний периоды, от конца апреля до конца мая. Ежегодная толщина снежного покрова в начальный период наблюдений была в пределах от 60 до 140 см при плотности от 0,32 до 0,45 г/см³.

На метеорологической станции Мыс Баранова наблюдения производились только в 2024 г., также в предвесенний и весенний периоды. Снежный покров в начале наблюдений составлял 20 см при средней плотности снега 0,34 г/см³. С учетом выпавших осадков за период наблюдения (37,7 мм) приведенный слой воды в снеге составил 105,7 мм. Наблюдения были начаты 16 апреля 2024 г. и ежедневно продолжались до 12 июня, т.е. 59 сут, и завершены после устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха выше 0 °С. Снежный

покров в это время уплотняется и состоит из крупных ледяных кристаллов. Температура его, как правило, держалась возле 0 °С.

Испарители типа ГГИ-500-6 не обеспечивают получение ежедневной непрерывной информации из-за пропусков в наблюдениях, обусловленных снегопадами и ветровым переносом снега [9]. По наблюдениям на метеорологической станции Баренцбург зимой 2024 г. (от 15 апреля до 27 мая) успешными оказались 43 даты измерения из 86 (50 % от продолжительности периода), среди которых только в 10 случаях были выполнены полные двухсрочные измерения в одни сутки. Данный результат является следствием погодных условий — за период наблюдения регулярно наблюдались осадки, оттепели и сильные ветра (из 43 суток 20 были без осадков). В табл. 1 приведены результаты наблюдений на метеорологической станции Баренцбург 2024 г.

Таблица 1

Результаты двухсрочных наблюдений за испарением со снега на метеорологической станции Баренцбург в 2024 г. [6]

Дата	Испарение, мм			Дата	Испарение, мм		
	ночь	день	сутки		ночь	день	сутки
18.04	0,28			11.05	0,48		
23.04		0,24		12.05	0,35		
24.04	0,09	0,20	0,29	13.05	0,68		
25.04		0,24		14.05	0,22		
26.04		0,28		15.05	0,33		
27.04	0,09	0,28	0,37	17.05	0,42	0,45	0,87
30.04	0,08			18.05	0,18		
02.05		0,058		20.05		0,83	
03.05	0,22	0,45	0,67	21.05	0,32	0,55	0,87
04.05		0,51		22.05	0,21	0,66	0,87
05.05	0,13	0,13	0,26	23.05	0,14		
06.05	0,18	0,38	0,56	24.05		0,16	
07.05		0,16		25.05	1,01	1,52	2,53
08.05	0,58	1,47	2,05	26.05		1,06	
09.05	0,51			27.05	0,35	0,74	1,09
10.05	0,31						

За период с 15.04 по 27.05.2024 г. было проведено 43 суточных наблюдения за испарением, из которых в 31 случае были получены определенные результаты (за ночной и дневной срок), что составляет 72 % от общей продолжительности. Только в 11 случаях были получены данные суточных величин испарения, т.е. в 26 % от общей продолжительности периода наблюдений. В остальные случаи (32 сут) результаты получены за дневной (22 сут) или ночной (20 сут) период наблюдений.

На метеорологической станции Мыс Баранова были произведены 36 полноценных полусуточных и суточных измерений величин испарившейся (сублимированной) влаги, что составляет 63 % от продолжительности периода наблюдений в 57 сут. Результаты наблюдений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты двухсрочных инструментальных наблюдений за испарением со снега на метеорологической станции Баранова, 2024 г.

Дата	Испарение, мм			Дата	Испарение, мм		
	ночь	день	сутки		ночь	день	сутки
17.04	–0,04	0,04	0,00	18.05	–0,02	0,28	0,26
18.04	–0,05	0,04	–0,01	20.05		0,63	
19.04	–0,03	–0,03	–0,06	21.05	0,02	0,14	0,16
20.04	0,00	0,02	0,02	22.05	0,14	0,28	0,42
29.04		–0,02		30.05		0,26	
04.05		0,03		31.05	0,20	–0,02	0,18
05.05	–0,04	0,49	0,45	01.06	0,04	0,48	0,52
06.05		0,04		02.06	0,21	0,17	0,38
07.05	0,14	0,03	0,17	03.06	0,22		
08.05	0,00	0,14	0,14	04.06	0,21	1,22	1,45
10.05		0,17		06.06		0,34	
12.05		0,12		07.06		0,16	
13.05	0,06	0,20	0,26	08.06	0,06	0,21	0,27
14.05	0,10	0,16	0,26	09.06		0,33	
15.05	–0,02	–0,04	–0,06	10.06	0,19	0,30	0,49
16.05	0,11	0,24	0,35	11.06	–0,12	0,21	0,09
17.05	0,12	0,11	0,23	12.06	0,02		

Таким образом, среднее количество ежегодных полноценных полусуточных и суточных измерений величин испарившейся (сублимированной) влаги составляет 44 % от средней продолжительности наблюдений в 50 сут.

Обсуждение результатов наблюдений за испарением со снежного покрова

Анализ результатов наблюдений за испарением на метеорологической станции Баренцбург за зимние периоды 2021–2024 гг. показал, что среднесуточная величина испарения со снега в предвесенний период равна 0,60 мм; в дневное время 0,43 мм и в ночное время — 0,17 мм, что составляет 40 % от дневного. В отдельные годы составляющие величины снеготаяния могут существенно отличаться по отношению к средним. Так, в 2024 г., с 18 апреля по 13 мая при среднесуточной температуре $-2,5^{\circ}\text{C}$ среднесуточная величина испарения со снега была равна 0,70 мм/сут. За ночной и дневной периоды — соответственно 0,31 и 0,37 мм. При повышении температуры до $-1,1^{\circ}\text{C}$ за период с 14 по 27 мая среднесуточная величина испарения составила 1,25 мм/сут, а за ночной и дневной периоды — соответственно 0,35 и 0,75 мм/сут.

Результаты наблюдений в районе метеорологической станции Мыс Баранова за испарением со снежного покрова и температуры воздуха в приземном слое приведены в табл. 3.

По данным инструментальных наблюдений в предвесенний период интенсивность испарения изменялась в диапазоне от $-0,0007$ до $0,009$ мм/ч, в мае среднее значение достигло $0,013$ мм/ч. Среднесуточная величина испарения составила $0,312$ мм/сут. При снеготаянии в июне интенсивность возрастает до $0,060$ мм/ч или $1,44$ мм/сут. В отдельные периоды она увеличивается до $0,102$ мм/ч, при котором суточная величина может достигнуть $2,4$ мм/сут. Этому способствует возросший приход тепла, при котором среднесуточная температура поднялась до $0,0^{\circ}\text{C}$ и выше. Поверхность снежного покрова становится влажной и покрывается квазижидкой пленкой.

Таблица 3

**Осредненные результаты инструментальных наблюдений
за испарением с поверхности снежного покрова в районе
метеостанции НИС «Ледовая база “Мыс Баранова”»**

Дата	Испарение, мм			Средняя температура воздуха, °С	Осадки, мм
	Сумма за месяц	Наибольшее суточное	Наименьшее суточное		
Апрель, 1–15	±0.01	+0.01	–0.01	–26.3	10.0
Апрель, 16–30	–0.07	0.02	–0.06	–18.0	3.60
Май, 1–31	4.07	0.63	–0.16	–6.6	19.6
Июнь, 1–12	4.23	1.43	0.09	0.00	4.50
Сумма, мм	8.24	–	–	–	37.7

За предвесенний и весенний период со снежного покрова в районе метеорологической станции Мыс Баранова испарилось 8,24 мм влаги. Испарение весной, в период интенсивного таяния снега, составляет более 50 % от общего за период наблюдений.

В работе [10] показано, что в суровые зимы в Центральной Якутии (декабрь, январь) может наблюдаться как испарение, так и конденсация. Но интенсивность этих процессов мала и сравнима с погрешностью их определения. Суммарное испарение с поверхности снега в основном определяется продолжительностью снеготаяния (апрель и частично март), при котором испаряется 87–97 % от суммы за зиму. В период таяния интенсивность испарения за счет адвекции тепла может достигать 2,0–2,5 мм/сут.

По данным инструментальных наблюдений установлено, что между результатами полусуточных и суточных наблюдений существуют корреляционные связи различной степени тесноты. Между величинами ночного (E_n) и дневного (E_d) ис-

парения со снега в районе метеорологической станции Баренцбург существует корреляционная зависимость вида

$$E_d = 1,295E_n + 0,2145, \quad (1)$$

коэффициент корреляции которой составляет 0,742 [6].

Аналогичная корреляционная зависимость наблюдается между величинами дневного испарения (E_d) и испарением за сутки (E_c). Зависимость возможно представить в виде уравнения

$$E_c = 1,423E_d + 0,0171 \quad (2)$$

при $r = 0,924$.

На метеорологической станции Мыс Баранова за ночной и дневной полусуточные периоды зависимость слабая, коэффициент корреляции её равен 0,569. Суточные величины испарения (E_c) и испарение за дневной полусуточный период (E_d), имеют достаточно устойчивую связь, описываемую уравнением вида

$$E_c = 1,11E_d + 0,035, \quad (3)$$

при коэффициенте корреляции 0,955. В ряде случаев полученные зависимости возможно использовать для ликвидации пропусков наблюдений.

Полученные результаты наблюдений над испарением со снежного покрова и над элементами метеорологического режима позволили установить степень зависимости испарения от определяющих факторов [6]. В качестве независимых переменных были выбраны следующие факторы (их среднесуточные значения): температура воздуха (T_v , °C), температура поверхности снега (T_n , °C), относительная влажность воздуха (H , %), дефицит влажности (D , гПа), скорость ветра на высоте 10 м (U , м/с), разность между значениями давления насыщения водяного пара, определенного по температуре поверхности снега и абсолютной влажности воздуха, а также суммарная солнечная коротковолновая радиация (Q , Вт/м²). Испарение представлено составляющими: E_n , E_d и их суммой. Не останавливаясь на детальном анализе корреляционной матрицы [6], укажем, что на этапе выбора оптимальной модели приме-

нялись разные сочетания независимых переменных. Методом линейного регрессионного анализа установлено, что наиболее высокая степень корреляции суточных величин испарения (E_c) существует при сочетании среднесуточного дефицита влажности воздуха (D) и скорости ветра (U). Для метеорологической станции Баренцбург она выражается уравнением линейной регрессии

$$E_c = 0,718D + 0,177U - 0,674 \quad (4)$$

при коэффициенте корреляции $r = 0,875$.

Главным препятствием при проведении наблюдений за испарением со снега являются практически постоянно действующие ветры. В первой половине апреля, по данным наблюдений на метеорологической станции Мыс Баранова, среднесуточная скорость ветра составляла 4,6 м/с и сопровождалась сильными поземками и метелью с осадками. Ветер усиливался до июня. Среднесуточная скорость возросла и составила 6,1 м/с. Отсюда возникают существенные пропуски как в полусуточных, так и в суточных периодах наблюдений.

В системе Росгидромета пропуски в наблюдениях ликвидируются по методу П.П. Кузьмина [11]. Не останавливаясь на анализе его методики, укажем, что восстановление пропусков в инструментальных наблюдениях на метеорологической станции Мыс Баранова за период с 17 апреля по 12 июня осуществлялось двумя способами: путем интерполяции между смежными наблюденными величинами и по методу П.П. Кузьмина, с использованием метеорологических данных по этой станции. Расчетное уравнение по Кузьмину имеет вид

$$E_p = (0,18 + 0,06U)(e_n - e_2), \quad (5)$$

где E_p — расчетная суточная величина испарения, мм; U — скорость ветра на высоте 10 м, м/с; разность $(e_n - e_2)$ между давлением насыщенного водяного пара e_n , вычисленным по данным срочных наблюдений за температурой поверхности снега, и парциальным давлением водяного пара на уровне 2 м, гПа.

Расчетная формула для метеостанции Баренцбург принимает вид

$$E_c = (0,18 + 0,09U)(e_n - e_2). \quad (6)$$

На основании многолетних наблюдений за испарением со снега на метеорологической станции Покровск (Республика Якутия) расчет по методике Кузьмина производится по формуле

$$E_c = (0,18 + 0,08U)(e_n - e_2). \quad (7)$$

В условиях суровых зим расчетная формула по Кузьмину может иметь осредненный коэффициент при скорости ветра 0,077.

Устранение пропусков наблюдений, а также расчет величин испарения со снежного покрова по наблюдаемым метеорологическим характеристикам возможно произвести следующими методами:

- полуэмпирическим методом, используя комплекс уравнений (1)–(3);
- расчет по модели $E_c = f(D, U)$, применяя уравнение (4) и среднесуточные величины дефицита влажности и скорости ветра;
- расчет по региональным уравнениям (5) и (6), на основании методики П.П. Кузьмина.

В ряде отдельных случаев целесообразно использовать метод линейной интерполяции. На рис. 2 приведены восстановленные пропуски во временном ходе наблюдений на метеостанции Баренцбург в 2024 г.

Средняя величина суточных значений испарения со снежного покрова в предвесенний период, рассчитанная по модели, на метеостанции Баренцбург составила 0,83 мм/сут. Наибольшая разность суточных величин, определенных рассматриваемыми методами, равна 0,11 мм/сут.

Средняя величина испарившейся влаги за зимне-весенний период, определенная расчетом по модели $E_c = f(U, D)$, равна 35,6 мм, с использованием расчетной формулы Кузьмина — 30,9 мм и полуэмпирическим методом — 40,2 мм. Величина

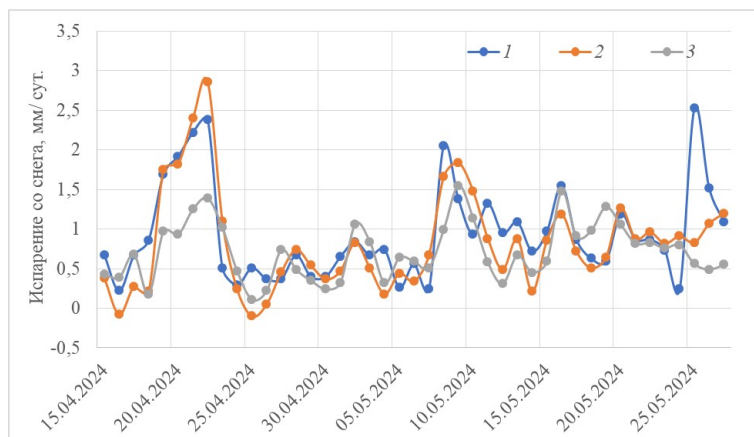


Рис. 2. Результаты наблюдений и расчета испарения за 2024 г. по метеостанции Баренцбург. 1 — расчет по полумэмпирическому методу; 2 — расчет по регрессионной модели $E_c = f(U, D)$; 3 — расчет по методу П.П. Кузьмина

испарения со снежного покрова, принятая как средняя, определенная из результатов расчета по трем методам, равна 35,6 мм за период наблюдений.

Восстановление пропусков в инструментальных наблюдениях на метеорологической станции Мыс Баранова за период с 17 апреля по 12 июня осуществлялось двумя способами: путем интерполяции между смежными наблюденными величинами и по методу П.П. Кузьмина. При восстановлении пропусков наблюдений методом линейной интерполяции общая сумма испарившейся влаги составляет 12,37 мм, что на 31,9 % меньше значений, полученных по методике Кузьмина, — 18,15 мм.

Учитывая, что количество выпавших осадков за период определения испарения составляет 37,7 мм, то общий слой воды в снеге должен составлять 105,7 мм. Тогда принятая величина испарения со снега (18,15 мм) составляет 17,2 % от общих снегозапасов. Значительные увеличения суточных вели-

чин испарения в весенний период обусловлены изменениями температуры приземного слоя атмосферы. Рост температуры от $-4,0$ до $-0,3$ °C обуславливает увеличение суточных потерь влаги до 1,5–2,0 мм.

Укажем, что расчет испарения со снежного покрова по методу Кузьмина при использовании только данных метеорологических наблюдений метеорологической станции Мыс Баранова составил за зимний период 20,8 мм. Применение модели $E_c = f(U, D)$ при ликвидации пропусков в наблюдениях дало завышенную величину испарения 35 мм и в дальнейшем не принималось в расчетах.

Выводы

Впервые путем проведения инструментальных наблюдений определена интенсивность испарения со снежного покрова в условиях Арктики (арх. Шпицберген, метеорологическая станция Баренцбург, 2021–2024 гг.). Из 118 суток наблюдений по метеорологической станции Баренцбург только 28,8 % были двухсрочными и не имели каких-либо ограничений. Аналогичные значения получены в 2024 г. и по метеорологической станции Мыс Баранова. На основе наблюдений по этим станциям сформирована опорная база двухсрочных (ночные и дневные) данных, в период определения которых отсутствовали осадки. Анализ массива по метеорологической станции Баренцбург показал, что среднесуточная величина испарения со снега в предвесенний период равна 0,60 мм, в дневное время 0,43 мм и в ночное время — 0,17 мм, что составляет 40 % от дневного. Установлено, что между дневным испарением и испарением за сутки существует зависимость с коэффициентом корреляции 0,924. Взаимная корреляция испарения за ночной и дневной периоды снижается до уровня $r = 0,742$. Зависимо-

сти выражены уравнениями, которые используются для восстановления пропусков в наблюдениях.

В предвесенний период, по данным метеорологических станций Баренцбург и Мыс Баранова, при температуре от -30 до -10°C испарение (сублимация) не превышает $\pm 0,01$ мм/сут. В предвесенний период, по мере повышения температуры воздуха, испарение начинает возрастать. На метеорологической станции Мыс Баранова за период с 16 по 30 апреля суммарная величина испарения (конденсации) составила $-0,07$ мм, среднесуточное ее значение составило $-0,01$ мм/сут. В мае испарение (по данным инструментальных измерений) достигает $0,23$ мм/сут. Весной при снеготаянии интенсивность испарения возрастает до $0,0095$ мм/ч, а наибольшее его значение увеличивается до $0,026$ мм/ч. С 1 по 12 июня среднесуточная величина испарения составила $0,42$ мм/сут, наибольшая — $1,43$ мм/сут. За период снеготаяния испарилось $4,23$ мм влаги. За предвесенний и весенний период инструментальным путем на метеорологической станции Мыс Баранова определен слой испарившейся воды, равный $8,23$ мм. Ветра, метели и другие неблагоприятные факторы приводят к недоучету испарившейся влаги. Для его ликвидации используют метод П.П. Кузьмина и линейную интерполяцию между смежными инструментальными измерениями. Применение этих методов дало следующие результаты: суммарное испарение за предвесенний и весенний период по методу П.П. Кузьмина равно $20,81$ мм; инструментальные наблюдения за период с 17 апреля по 12 июня, восстановленные с применением линейной интерполяции — $12,4$ мм; пропуски в инструментальных наблюдениях, восстановленные по методу Кузьмина — $18,15$ мм. Принятая величина испарения со снега в районе метеорологической станции Мыс Баранова в 2024 г. равна $18,15$ мм.

На основании инструментальных наблюдений на метеорологической станции Баренцбург, методом линейного регрессионного анализа построена таблица, позволяющая оценить воздействия метеорологических факторов на процесс испарения. Установлено, что наибольшее влияние на процесс испарения оказывает скорость ветра ($r=0,822$), дефицит влажности ($r=0,670$) и температура воздуха ($r=0,724$). При выборе оптимальной модели испарения была отобрана одна, чья совокупность характеристик была наиболее качественной — $E_c = f(D, U)$. Коэффициент корреляции суточных сумм испарения в этой модели равен 0,875.

Ликвидацию пропусков в наблюдениях и расчет суточных величин испарения предлагается осуществлять: применением модели $E_c = f(D, U)$, полуэмпирическим методом, линейной интерполяцией и по методу П.П. Кузьмина. Средняя величина испарившейся влаги за зимне-весенний период в районе метеорологической станции Баренцбург, определенная расчетом по модели $E_c = f(D, U)$, равна 35,6 мм, с использованием расчетной формулы Кузьмина — 30,9 мм и полуэмпирическим методом — 40,2 мм. Принятая величина испарения со снежного покрова, определенная по результатам расчетов по трем методам, равна 35,6 мм.

Литература

1. Кузнецов В.И. Испарение со снежного покрова // Труды ГГИ. 1964. Вып. 109. С. 3–36.
2. Петропавловская М.С., Калужный И.Л. Снегоперенос на территории Северного Казахстана // Метеорология и гидрология. 1986. № 2. С. 81–90.
3. Liston G.E., Sturm M. The role of winter sublimation in the Arctic moisture budget // Nordic Hydrology. 2004. Vol. 35. P. 4–5. DOI: 10.2166/nh.2004.0024

4. *Strasser U., Bernhardt M., Weber M., Liston G.E., Mauser W.* Is snow sublimation important in the alpine water balance? // *The Cryosphere*. 2008. Vol. 2. P. 53–66. DOI: 10.5194/tc-2-53-2008
5. *Постников А.Н.* Испарение с поверхности снежного покрова за период его залегания на территории России // *Ученые записки РГГМУ*. 2016. № 42. С. 55–63.
6. *Василевич И.И., Калюжный И.Л., Масловский А.С.* Испарение со снежного покрова архипелага Шпицберген в весенний период // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025. Т. 71, № 1. С. 17–31. DOI: 10/30758/0555-2648-2025-71-1-17-31
7. *Калюжный И.Л.* Пути усовершенствования метода измерения испарения со снежного покрова // *Труды ГГО*. 2022. № 606. С. 159–168.
8. Методические рекомендации по производству наблюдений за испарением с почвы и снежного покрова. Л. : Гидрометеиздат, 1991. 234 с.
9. *Калюжный И.Л., Скороспехова Т.В.* Оценка современного состояния методов измерения и расчета испарения со снега // *Труды ГГО*. 2022. Вып. 605. С. 109–137.
10. *Павлов А.В.* Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Изд-во «Наука», Сибирское отделение. 1979. 385 с.
11. *Кузьмин П.П.* К методике исследования и расчета испарения с поверхности снежного покрова // *Труды ГГИ*. 1953. Вып. 241 (95). С. 34–52.

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ И СИНОПТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НИЗОВЫХ И ОБЩИХ МЕТЕЛЕЙ В ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

Л.Г. Ананова, А.П. Коваленко, В.Ю. Мацедон

*ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский государственный университет», Томск*

Для территории Западной Сибири метели являются опасным атмосферным явлением. Сопровождаясь сильным ветром, выпадением и переносом снега, они вызывают снежные заносы, в результате чего нарушается регулярное движение транспорта, метели ухудшают видимость и затрудняют взлет и посадку самолетов. Цель данного исследования заключается в изучении метеорологических и синоптических условий, которые приводят к образованию низовых и общих метелей на территории Томской области, период исследования с 2018 по 2024 г. В работе проведено сравнение с исследованиями метелей более раннего периода.

Ключевые слова: метель, синоптический анализ, барические образования, атмосферные фронты

METEOROLOGICAL AND SYNOPTIC CONDITIONS OF THE ORIGIN OF LOW-LEVEL AND OVERALL SNOWSTORMS IN THE TOMSK REGION

L.G. Ananova, A.P. Kovalenko, V.U. Matsedon

Tomsk State University, Tomsk

Snowstorm is a dangerous atmospheric phenomenon for the territory of Western Siberia. Accompanied by strong winds, snowfall and drifting, they cause snow drifts, which disrupt regular traffic. Snowstorms visibility and make it difficult for aircraft to take off and land. The purpose of this study is to examine the meteorological and synoptic conditions that lead to the formation of snowstorms in the Tomsk region; the study period included 2018 to 2024. The work contains a comparison with studies of snowstorms of an earlier period.

Keywords: snow drifting, synoptic analysis, baric formations, atmospheric fronts

Введение

Условия для развития метелей на юге Западной Сибири в целом более благоприятны, чем на Европейской территории России [1]. Изучение характеристик низовых и общих метелей на территории Томской области имеет большое значение для экономического планирования работы транспорта и других отраслей народного хозяйства. Метелью называется перенос снега с поверхности снежного покрова под влиянием сильного порывистого ветра, в результате чего происходит перераспределение высоты снежного покрова, а также изменение структуры снега [2]. В зависимости от высоты, на которую ветер поднимает снег с поверхности, различают метель общую, низовую и поземок.

Для метелевой деятельности характерны региональные особенности, связанные со специфичностью синоптических процессов, её определяющих [3]. Эти особенности необходимо изучать, в том числе и для повышения качества прогнозов.

Цель данного исследования заключается в изучении метеорологических и синоптических условий возникновения низовых и общих метелей на территории Томской области. Период исследования включает шесть зимних сезонов с 2018 по 2024 г.

Исследованием метелей на юго-востоке Западной Сибири в разные годы занимались В.Н. Барахтин [1, 4, 5], Г.Г. Журавлёв [6, 7], В.П. Горбатенко [7], Е.Л. Тунаев [7] и другие авторы [8]. В работах [6–8] авторы указывают на значительное, в 3–5 раз, уменьшение числа дней с метелями и продолжительности метелей на территории Томской области в последние годы. Основными причинами таких изменений являются: увеличение защищенности метеорологических площадок вследствие роста деревьев; изменение режима общей циркуляции атмосферы; тенденция к падению атмосферного давления и ослаблению градиентов в поле приземного давления [6].

Тенденция повышения температуры воздуха на юго-востоке Западной Сибири приводит к более позднему становле-

нию снежного покрова и более раннему его сходу [9]. Это может быть одной из причин уменьшения количества метелей на территории Томской области в последние годы.

Возможной причиной уменьшения числа дней с метелями и продолжительности метелей на территории Томской области являются изменения в правилах передачи штормовых сообщений. В 2013 г. вышел РД 52.04.563-2013 (код WAREP) [10], который устанавливает типовой перечень опасных (ОЯ) и неблагоприятных гидрометеорологических явлений (НГЯ) и их критерии для передачи штормового сообщения.

Сильная метель считается опасным явлением погоды (ОЯ), если наблюдается общая или низовая метель при сильном ветре, вызывающая значительное ухудшение метеорологической дальности видимости (МДВ), средняя скорость ветра не менее 15 м/с при МДВ не более 500 м продолжительностью не менее 12 ч [11].

Метель (низовая метель, общая метель) считается НГЯ при средней скорости ветра 12 м/с и МДВ 2000 м и менее [10].

Материалы и методы исследования

Источником информации о метелях на территории Томской области послужили журналы «Шторм» за осенне-зимний период с 2018 по 2024 г., предоставленные Томским центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ТЦГМС).

За случай с метелью принимали зафиксированную на метеорологической станции метель (низовую или общую) со скоростью ветра от 12 м/с и более и внесенную в журнал входящих штормовых телеграмм. Расположение метеорологических станций на территории Томской области показано на рис. 1.

Из журналов были выписаны следующие параметры для каждого случая с низовой и общей метелью: название станции, дата (число, месяц, год); время начала и окончания метелей, средняя скорость и максимальный порыв ветра (м/с), минимальная МДВ при метели (м). В дальнейшем данные были

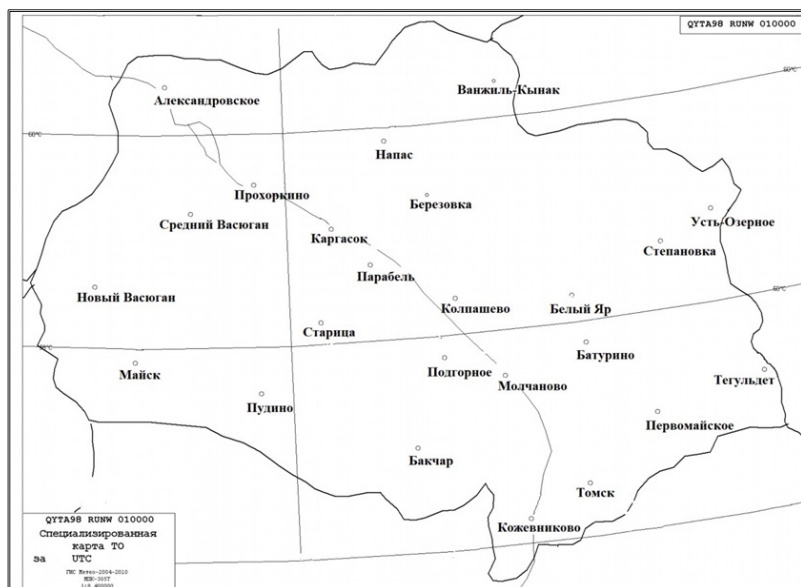


Рис. 1. Специализированная карта Томской области с указанием местоположения метеорологических станций

дополнены сведениями о направлении ветра, взятыми с сайта «Расписание погоды» (URL: <https://rp5.ru/>). Поскольку наблюдения на метеостанциях производятся по всемирному скоординированному времени (BCV), в данном исследовании использовалось время BCB. Данные о метелях были перенесены в электронные таблицы и отсортированы по месяцам за каждый год.

Для анализа синоптических условий возникновения метелей были исследованы приземные синоптические карты за основные синоптические сроки (00, 06, 12, 18 BCB) и кольцевые карты погоды за сроки, ближайšie ко времени возникновения метелей (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 BCB). В исследовании использовался архив синоптических карт авиационной метеорологической станции гражданской Томск (АМСГ Томск).

За время исследования было проанализировано около 1200 синоптических карт, а число случаев с низовыми и общими метелями на территории Томской области за семь лет составило 150. По приземным синоптическим картам для каждого случая определялись следующие синоптические характеристики: тип атмосферного фронта; контраст температуры в зоне фронта ($^{\circ}\text{C}/1000\text{ км}$); тип барического образования; давление в центре барического образования; траектория смещения циклона. Выводы получены при использовании синоптических методов, пакетов прикладных программ Microsoft и Paint.

Метеорологические условия возникновения низовых и общих метелей в Томской области

За исследуемый период низовые и общие метели на территории Томской области отмечались с октября по май на 18 гидрометеорологических станциях (ГМС). За шесть осенне-зимних сезонов с октября 2018 г. по май 2024 г. на метеостанции Берёзовка не было наблюдений, на ГМС Прохоркино, Ванжиль-Кынак, Пудино, Старица и Тегульдет низовые и общие метели не отмечались.

Чаще всего метели отмечались на метеостанциях Каргасок (24 случая с метелями за 6 лет), Парабель (18 случаев), Средний Васюган, Майск и Степановка (по 15 случаев).

В 90 % случаев метеостанции зафиксировали низовые метели, 10 % случаев приходится на общие метели.

Больше всего метелей отмечалось зимой 2023–2024 гг. (31 %), немного меньше метелей (23 %) наблюдалось зимой 2019–2020 гг. (рис. 2).

Для исследования сезонного хода повторяемости метелей на территории Томской области было рассмотрено количество дней с метелью по месяцам за период с 2018 по 2024 г. В течение зимнего сезона метели распределены неравномерно (рис. 3), наибольшая повторяемость метелей отмечается в январе (28 %) и марте (31 %). Небольшая повторяемость метелей

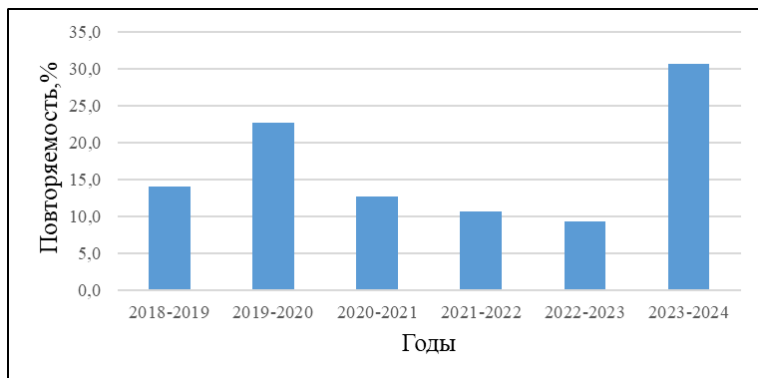


Рис. 2. Повторяемость (%) метелей по зимним сезонам с 2018 по 2024 г. на территории Томской области

в декабре и феврале объясняется особенностями циркуляции над Западной Сибирью в последние годы. В апреле и мае на всей территории количество метелей резко уменьшается, они отмечаются только на северных станциях.

Важной характеристикой метелей является их продолжительность. В рамках данного исследования продолжительность метелей за период 2018–2024 гг. на территории Томской области составляла от 10 мин до 15 ч. Наибольшая продолжительность метелей (15 ч) отмечена на метеостанции Майск (22.03.2020 г.), наименьшая (10 мин) — на метеостанциях

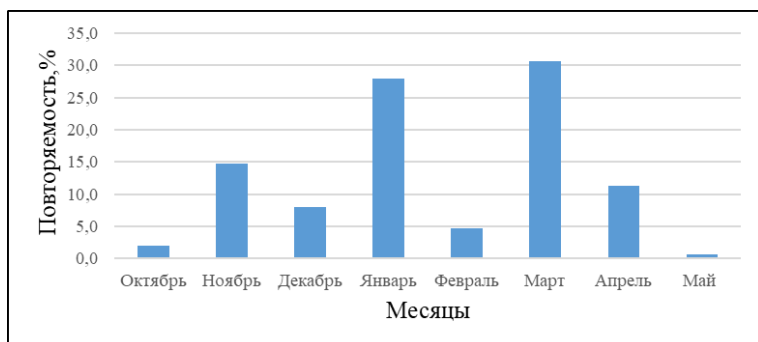


Рис. 3. Повторяемость (%) метелей на территории Томской области в течение зимнего сезона (2018–2024 гг.)

Парабель (04.11.2020 г.) и Средний Васюган (30.12.2023 г.). Средняя продолжительность метелей за период 2018–2024 гг. на территории Томской области составила 3 ч 8 мин.

Суточный ход метелевой деятельности не выражен, можно отметить небольшое увеличение количества метелей в 00 и 10 ч ВСВ, что соответствует 7 ч утра и 17 ч дня по местному времени.

Возникновение метелей в первую очередь связано с режимом ветра. Одной из важных характеристик метелей являются направление и скорость ветра при метелях. Увеличение скорости ветра может привести к ухудшению видимости, что является достаточно опасным для авиации и транспорта.

В рамках данного исследования были проанализированы средняя и максимальная скорость ветра (порыв) при возникновении низовых и общих метелей на территории Томской области. Результаты исследования представлены в табл. 1.

За рассматриваемый период на территории Томской области чаще всего наблюдаются метели при средней скорости ветра от 6 до 9 м/с (64 %). Низовая метель при средней скорости ветра 15 м/с была отмечена на станции Бакчар 29 декабря 2023 г. Минимальные скорости ветра (≤ 5 м/с) отмечаются примерно в четверти случаев (27 %).

Таблица 1

Повторяемость (%) средней и максимальной скорости ветра (м/с) при низовых и общих метелях на территории Томской области (2018–2024 гг.)

	Средняя скорость ветра, м/с				Максимальная скорость ветра (порыв), м/с		
Градации скорости ветра	≤ 5	6–9	10–14	15–19	10–14	15–19	20–24
Повторяемость (%) метелей при различных скоростях ветра	26,7	64,0	8,7	0,7	42,0	47,3	10,7
	100				100		

Максимальные скорости ветра при метелях за исследуемый период достигали 20–22 м/с. Отмечались они в 10 % случаев, главным образом в марте 2020 г., декабре 2023 г. и январе 2024 г. при выходе глубоких западных (2 тип) и юго-западных циклонов (3 тип) с давлением в центре циклонов менее 980 гПа.

Метели, достигающие критериев ОЯ (средняя скорость ветра не менее 15 м/с при МДВ не более 500 м и продолжительностью не менее 12 ч) [10, 11], за исследуемый период не отмечались.

Для обслуживания железных дорог, автомагистралей и авиации немаловажно знать направление ветра при возникновении метелей. Для железных дорог и автомагистралей эта информация нужна при установке защитных сооружений от снега, для авиации — при взлете и посадке самолетов.

Особенности циркуляции атмосферы на юго-востоке Западно-Сибирской равнины обуславливают преобладание юго-западных и южных ветров [12]. Повторяемость различных направлений ветра при низовых и общих метелях на территории Томской области представлена на рис. 4.

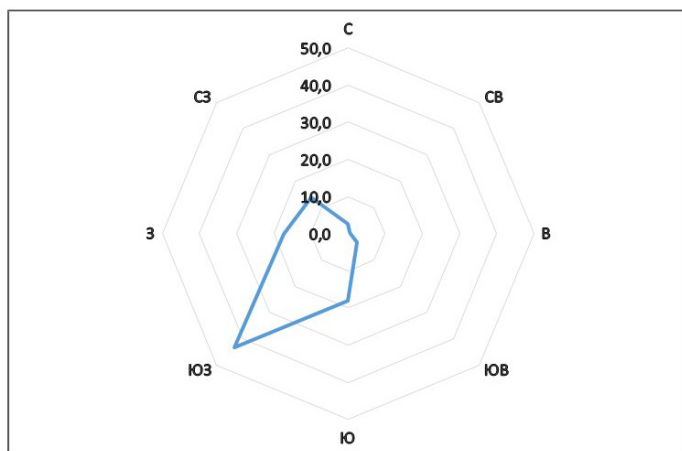


Рис. 4. Диаграмма повторяемости (%) направлений ветра при метелях на территории Томской области (2018–2024 гг.)

Преобладающим направлением ветра при возникновении метелей является юго-западное (43 %), повторяемость южного и западного ветров при метелях примерно одинакова (18 %), реже всего метели возникают при северо-восточном и восточном направлениях ветра (не более 1 %).

Сравнивая полученные нами результаты исследования метеорологических условий возникновения низовых и общих метелей на территории Томской области с исследованиями, проведёнными ранее [6–8], можно сказать, что в целом они совпадают.

Продолжительность метелевого сезона в Томской области с октября по май, преобладающее юго-западное направление ветра при метелях совпадают с результатами, полученными в работах [6–8]. Средняя продолжительность метелей в нашем исследовании составляет 3 ч 8 мин, что входит в диапазон продолжительности метелей, полученный в работах [6, 7].

Но есть и отличия. В нашем исследовании максимальная повторяемость метелей приходится на март и январь, а в работе [8] — на декабрь и январь. Возможно, это связано с особенностями циркуляционных процессов в исследуемый период.

Синоптические условия возникновения низовых и общих метелей в Томской области

Прогноз интенсивности и продолжительности метелей тесно связан с прогнозом направления, скорости перемещения и эволюцией циклонов. Для более детального изучения синоптических условий возникновения низовых и общих метелей, в каждом типе барических образований в исследовании использовалась классификация, разработанная В.П. Горбатенко, И.И. Ипполитовым и Н.В. Поднебесных [13, 14]. В данной методике барические образования подразделяются на несколько типов по месту зарождения и траектории движения. В соответствии с данной классификацией выделяются следующие барические образования, приходящие на территорию Западной Сибири и влияющие на погодные условия:

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

2 — западные циклоны, образующиеся на волне полярного фронта в районе Екатеринбурга, Омска, Самары;

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

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

5 — южные циклоны, приходящие из районов Ашхабада, Ташкента или из междуречья Аму-Дарьи и Сыр-Дарьи, смещаются на северо-восток;

6 — местные циклоны, образующиеся непосредственно на территории Западной Сибири: на южной части или в районе междуречья Обь-Иртыш;

7 — северные циклоны, которые приходят из районов Кольского полуострова, Баренцева моря или севера Европейской территории России, смещаются на юго-восток.

С 8 по 12 — типы антициклонов, пришедших на территорию Западной Сибири и образовывавшихся над ней.

Для выявления региональных особенностей возникновения низовых и общих метелей в Томской области по кольцевым картам погоды определялся тип барического образования, при котором возникали метели.

Каждый случай с низовой и общей метелями классифицировался по месяцу и типу барического образования, в котором наблюдался:

- 1) циклон (с I по VII тип);
- 2) антициклон (с VIII по XII тип).

Поскольку случаев с возникновением низовых и общих метелей в антициклонах любого типа за период исследования с 2018 по 2024 г. на территории Томской области не зафиксировано, то данные типы барических образований в таблице отсутствуют. Результаты исследования представлены в табл. 2.

Таблица 2

Повторяемость метелей (%) в различных типах барических образований с 2018 по 2024 г.

Типы барических образований	Месяцы								Всего за сезон
	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	
1	0,7	0,7	1,3	–	0,7	8,0	0,7	–	12,0
2	–	3,3	6,0	14,0	3,3	5,3	3,3	0,7	36,0
3	1,3	4,0	–	8,0	0,7	10,7	–	–	24,7
4	–	4,7	0,7	4,7	–	4,7	–	–	14,7
5	–	–	–	–	–	–	0,7	–	0,7
6	–	–	–	–	–	–	2,0	–	2,0
7	–	2,0	–	1,3	–	2,0	4,7	–	10,0
Всего	2,0	14,7	8,0	28,0	4,7	30,7	11,3	0,7	100,0

Анализ синоптических условий при возникновении метелей на территории Томской области показал, что большинство метелей возникает при выходе на территорию Западной Сибири западных циклонов 2 типа (36 %). Чаще всего метели в циклонах этого типа отмечались в январе.

В западных циклонах 2 типа, которые образуются на волне полярного фронта в районе Свердловска, Омска, Самары, за 2018–2024 гг. зафиксировано 54 случая формирования метелей в Томской области. Пример смещения циклона 2 типа (западный) представлен на рис. 5.

Циклон сформировался в районе Самары в 00 ВСВ 13 февраля 2024 г. и вышел на территорию Западной Сибири в 00 ВСВ 14 февраля 2024 г. В этот день на территории Томской области были зафиксированы два случая возникновения метели на станциях Кожевниково и Первомайское в данном типе барического образования.

Четвёртая часть метелей (24,7 %) на территории Томской области возникает в юго-западных циклонах (3 тип), максимальная повторяемость метелей в циклонах 3 типа отмечается в марте.

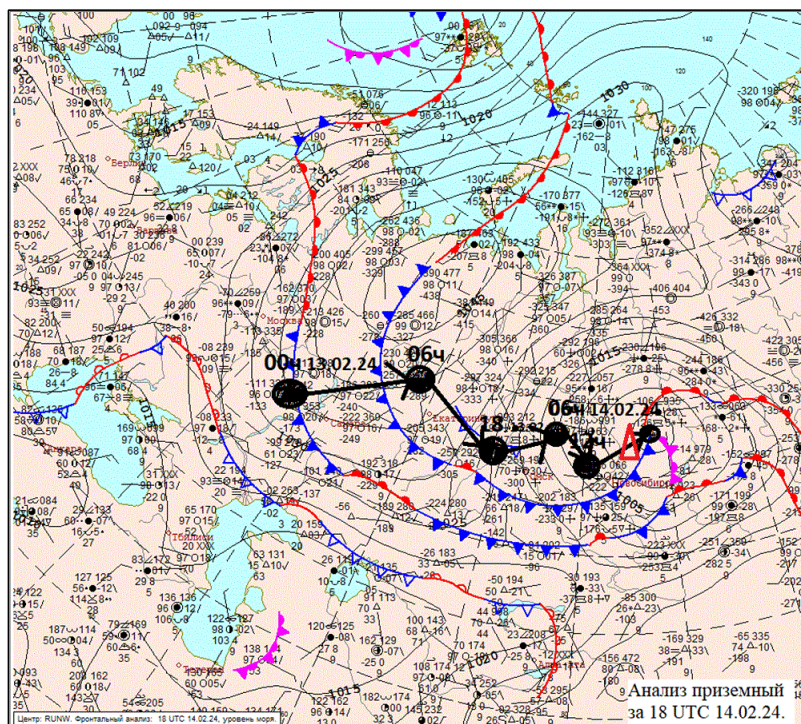


Рис. 5. Фрагмент приземной карты за 18 UTC 14.02.2024 г.
Траектория перемещения западного циклона (2 тип)

На рис. 6 показано перемещение юго-западного циклона 3 типа, образовавшегося в ложбине к 06 ч 20.03.20 г. над Каспийским морем.

Постепенно циклон смещался на северо-восток и на территорию Западной Сибири пришел к 6 ч 22.03.2020 г. С этим циклоном связано возникновение метелей в 10 случаях в этот день на территории Томской области. В том числе самая продолжительная (15 ч) метель на станции Майск.

В северных циклонах, смещающихся из районов Кольского полуострова, севера ЕТР и северного Урала, относящихся к 7 группе, зафиксировано 15 случаев с метелью, что составляет 10 % от общего числа барических образований, в которых формировались метели на территории Томской области (табл. 2).

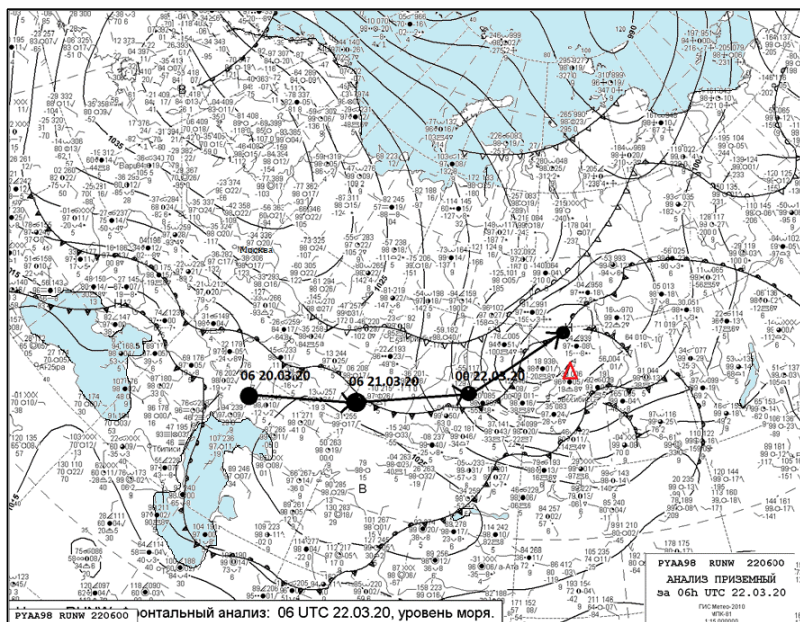


Рис. 6. Фрагмент приземной карты за 06 UTC 22.03.2020 г.
Траектория перемещения юго-западного циклона (3 тип)

Пример смещения северного циклона 7 типа представлен на рис. 7.

Формирование северного циклона седьмого типа началось в 00 ч 28.02.2022 г. над Баренцевым морем. Циклон постепенно смещался на архипелаг Новая земля, Обскую губу и пришел на территорию Западной Сибири к 06 ч 01.03.2022 г. В 18 ч 01.03.2022 г. на метеорологической станции Каргасок зафиксировали начало метели.

Примерно с одинаковой повторяемостью (от 12 до 15%) метели на территории Томской области формируются при выходе западных циклонов 1 типа и северных циклонов 4 типа (табл. 2).

Реже всего метели отмечались в местных циклонах 6 типа (2%) и при выходе южного циклона 5 типа (менее 1%).

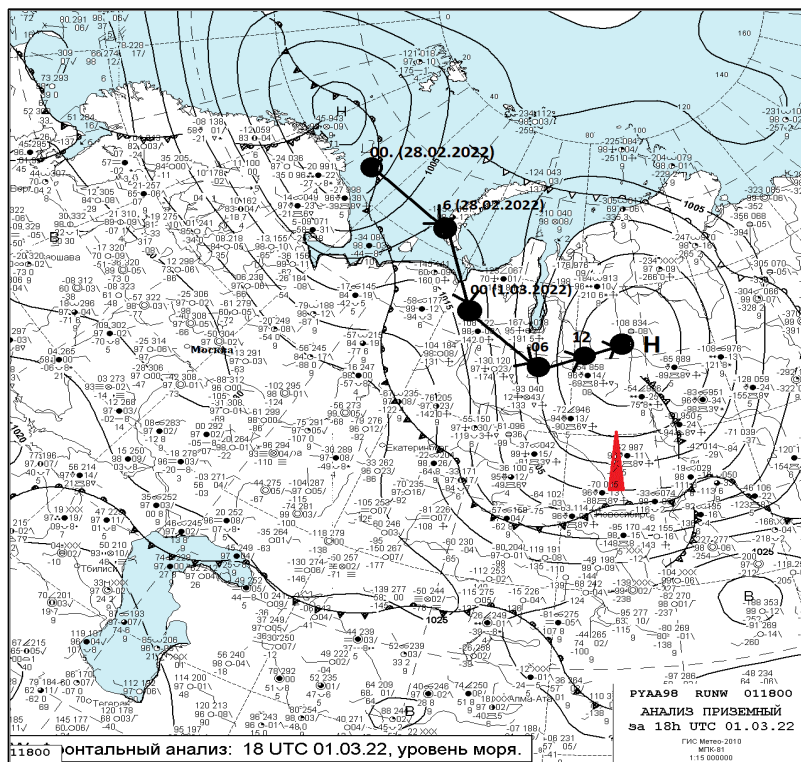


Рис. 7. Фрагмент приземной карты за 18 UTC 01.03.2022 г.
Траектория перемещения северного циклона (7 тип)

22 апреля 2022 г. в тыловой части местного циклона (6 тип) низовые метели были отмечены на трёх станциях, расположенных недалеко друг от друга. Продолжительность метелей на станциях Парабель, Колпашево и Каргасок в этом случае составила от 2 до 9 ч, видимость изменялась от 500 до 2000 м.

18 апреля 2023 г. станция Каргасок отметила метель при выходе южного циклона (5 типа), это был единственный случай возникновения низовой метели в южном циклоне.

Метели могут возникать в разных частях циклонов и антициклонов [3]. По синоптическим картам можно определить части барических образований, в которых формируются метели.

Для циклона были выделены 4 типа синоптических ситуаций: передняя часть циклона; центральная часть циклона; тёплый сектор и тыловая часть циклона. Результаты исследования представлены в табл. 3.

Анализ синоптических ситуаций при формировании низовых и общих метелей на территории Томской области показал, что абсолютное большинство метелей (60 %) в данном районе возникает в тыловой части циклона. В тёплом секторе циклона было зафиксировано 24 % случаев с метелями. В 10 % случаев метели образовывались в передней части циклона перед тёплым фронтом. Реже всего (6 %) метели возникают в центральной части циклона на удалении не более 200 км от его центра, тем не менее такие случаи тоже возможны.

Метели, как правило, образуются при прохождении атмосферных фронтов и увеличении барических градиентов. Метели Западной Сибири обычно очень интенсивны, они развиваются с одинаковой силой перед теплыми и за холодными фронтами [3].

Таблица 3

Повторяемость метелей (%) в зависимости от синоптической ситуации (2018–2024 гг.)

Синоптические ситуации	Месяцы								Всего за сезон
	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	
Центральная часть циклона	–	2,0	0,7	–	1,3	2,0	–	–	6
Передняя часть циклона	–	2,0	–	4,7	1,3	2,0	–	–	10
Тёплый сектор	–	2,0	4,0	7,3	1,3	7,3	2,0	–	24
Тыловая часть циклона	2,0	8,7	3,3	16,0	0,7	19,3	9,3	0,7	60
Всего	2,0	14,7	8,0	28,0	4,7	30,7	11,3	0,7	100

Таблица 4

**Повторяемость метелей (%) на атмосферных фронтах
(2018–2024 гг.)**

Тип фронта	Месяцы								Всего за сезон
	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	
Холодный	0	3,3	2,7	14,7	0,0	16,7	1,3	0,7	39,3
Тёплый	0	2,7	0,0	5,3	1,3	1,3	0,7	0,0	11,3
Окклюзия	0	2,0	4,0	2,7	2,7	6,0	1,3	0,0	18,7
Вторичный холодный	2	6,7	1,3	5,3	0,7	6,7	8,0	0,0	30,7
Всего	2	14,7	8,0	28,0	4,7	30,7	11,3	0,7	100,0

Все случаи формирования низовых и общих метелей на территории Томской области за период с 2018 по 2024 г. классифицировались не только по типу барического образования, но также и по наблюдению в зоне фронта (с выделением типа).

В результате исследования влияния атмосферных фронтов на возникновение метелей на территории Томской области была составлена таблица повторяемости метелей на атмосферных фронтах за период с 2019 по 2024 г. (табл. 4).

За период исследования максимальные значения повторяемости низовых и общих метелей отмечались на холодных фронтах (40 %) и вторичных холодных фронтах (31 %). На фронтах окклюзии, расположенных обычно в тёплом секторе циклона, метели формировались в 18 % случаев. Минимальная повторяемость метелей наблюдалась на тёплых фронтах — 11 %. Наибольший процент метелей наблюдался на холодных фронтах в марте (16,7 %), на тёплых фронтах в январе (5,3 %).

Интенсивность и продолжительность метелей зависит не только от типа траектории циклона, но и от интенсивности

Таблица 5

**Повторяемость (%) метелей в зависимости от давления
в центре циклона (гПа) с 2019 по 2024 г.**

Повторяемость метелей, %	Давление в центре циклона, гПа						Всего
	≤969	970– 979	980– 989	990– 999	1000– 1009	≥1010	
	6,0	22,7	33,3	30,7	4,0	3,3	
							100,0

процесса развития циклонической деятельности [1]. Интенсивность циклона определяется давлением в его центре. Одной из характеристик, определяемых нами по приземным синоптическим картам, для каждого случая зафиксированной метели было давление в центре циклона (гПа) (табл. 5).

Большинство метелей на территории Томской области возникает в глубоких циклонах, где давление принимает значения от 980 до 999 гПа (64 %). Около 7 % метелей наблюдались в циклонах с давлением 1000 гПа и более, так как такие циклоны приходили на территорию исследуемого района реже всего. 93 % метелей формируется в циклонах с давлением в центре менее 1000 гПа.

Самое низкое атмосферное давление в циклоне при метели составило 968 гПа и отмечалось в юго-западном циклоне (3 тип) 10.01.2024 г. Стоит отметить, что при анализе приземных синоптических карт в дни, когда была зафиксирована метель, было замечено, что именно в юго-западных циклонах чаще наблюдались наиболее низкие значения давления.

Наибольшее значение давления в центре циклона было зафиксировано 22.01.2023 г. в северном циклоне 7 типа и составило 1020 гПа. Это достаточно высокое значение давления для циклона. В этот день на станции Кожевниково была зафиксирована низовая метель в передней части циклона перед тёплым фронтом, продолжительность метели составила 40 мин, видимость при метели ухудшалась до 2000 м.

В.Н. Барахтин в своих работах [1, 4, 5], проведённых в середине XX века, отмечал, что «сильные метели на юге Западной Сибири связаны с прохождением трёх категорий циклонов: западных, юго-западных и северо-западных». Наши ис-

следования в основном подтверждают этот вывод, с той лишь разницей, что мы использовали более детальную классификацию циклонов [13].

В работе А.С. Ивановой [15] установлено, что «сильные метели наблюдались в западном и центральном районах Иркутской области в период с ноября по март при прохождении динамически значимых атмосферных фронтов в тыловой части глубоких циклонов», в этом результаты наших исследований совпадают.

Заключение

В результате изучения метеорологических и синоптических условий возникновения низовых и общих метелей на территории Томской области за период с 2018 по 2024 г. получены следующие основные выводы.

1. Метелевый сезон на территории Томской области продолжается с октября по май. В течение зимнего сезона метели распределены неравномерно, наибольшая повторяемость метелей отмечается в марте (31 %) и январе (28 %). Больше всего метелей отмечалось зимой 2023–2024 гг. (31 %).

2. Продолжительность метелей на территории Томской области составляла от 10 мин до 15 ч. Наибольшая продолжительность метелей (15 ч) отмечена на метеостанции Майск (22.03.2020 г.). Средняя продолжительность низовых и общих метелей составила 3 ч 8 мин.

3. За рассматриваемый период на территории Томской области чаще всего наблюдались метели при средней скорости ветра 6–9 м/с (64 %) и максимальной скорости ветра (порыв) 15–19 м/с (47 %). Преобладающим направлением ветра при возникновении метелей является юго-западное (43 %).

4. Анализ синоптических условий при возникновении метелей на территории Томской области показал, что большинство метелей возникает при выходе на территорию Западной Сибири западных (2 тип, 36 %), юго-западных (3 тип, 25 %) и северных циклонов (4 тип, 15 %).

5. Абсолютное большинство метелей (60 %) в данном районе возникает в тыловой части циклона. В тёплом секторе

циклона было зафиксировано 24 % случаев с метелями. В 10 % случаев метели образовывались в передней части циклона перед тёплым фронтом.

6. За период исследования максимальные значения повторяемости низовых и общих метелей отмечались на холодных фронтах (40 %) и вторичных холодных фронтах (31 %). На фронтах окклюзии, расположенных обычно в тёплом секторе циклона, метели формировались в 18 % случаев. Минимальная повторяемость метелей наблюдалась на тёплых фронтах — 11 %.

93 % низовых и общих метелей на территории Томской области формируются в циклонах с давлением в центре менее 1000 гПа.

Большинство низовых и общих метелей как наиболее опасных на территории Томской области возникает на динамически значимых атмосферных фронтах при выходе глубоких западных и юго-западных циклонов с давлением в центре менее 1000 гПа.

Подводя итоги проделанной работы, хочется отметить, что детальное исследование синоптических условий с расчетами повторяемости возникновения метелей в разных синоптических ситуациях, на атмосферных фронтах и в различных типах барических образований по классификации [13] проводится впервые для территории Томской области.

Результаты исследования метеорологических и синоптических условий возникновения метелей на территории Томской области могут быть полезны синоптикам гидрометеорологических центров и авиационных метеорологических станций, расположенных на юго-востоке Западной Сибири.

Литература

1. *Барахтин В.Н.* Прогноз особо опасных метелей на юге Западной Сибири // Труды ЗСРНИГМИ. 1972. Вып. 6. С. 60–64.
2. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3. Ч. 1. Метеорологические наблюдения на станциях. Л. : Гидрометеиздат, 1985. 300 с.

3. *Севастьянова Л.М., Ахметшина А.С.* Методы краткосрочных прогнозов погоды общего назначения: учебное пособие / под ред. И.В. Кужевской. Томск : Издательский дом ТГУ, 2014. С. 77–79.
4. *Барахтин В.Н.* Аэросиноптические условия развития западных циклонов, обуславливающих возникновение особо опасных метелей на юго-востоке Западной Сибири // Труды НРГМЦ. 1969. Вып. 3. С. 52–65.
5. *Барахтин В.Н.* Аэросиноптическая характеристика метелей юга Западной Сибири, обусловленных северо-западными и юго-западными циклонами, и рекомендации к их прогнозу // Труды НРГМЦ. 1971. Вып. 5. С. 179–192.
6. *Журавлёв Г.Г.* Динамика метелей Томской области в современный период // Вестник Томского государственного университета. 2013. № 369. С. 181–187.
7. *Журавлев Г.Г., Горбатенко В.П., Тунаев Е.Л.* Метели на территории Томской области // Труды ГГО. 2019. Вып. 594. С. 137–151.
8. *Горбатенко В.П., Журавлев Г.Г., Носырева О.В., Волкова М.А., Кижнер Л.И., Константинова Д.А.* Современные изменения климатических условий, определяющих накопление снега на автомобильных дорогах Томской области // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. Т. 4. С. 39–54.
9. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб. : Научное издание, 2022. 124 с.
10. РД 52.04.563-2013. Инструкция по подготовке и передаче штурмовых сообщений наблюдательными подразделениями. Дата введения 2014-04-07. СПб., 2013. 52 с.
11. РД 52.27.724-2019. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды. Дата введения 2019-06-25. М. : ФГБУ «Гидрометцентр России», 2019. 72 с.
12. *Евсеева Н.С.* География Томской области (Природные условия и ресурсы). Томск : Изд-во Томского ун-та, 2001. 223 с.
13. *Горбатенко В.П., Ипполитов И.И., Поднебесных Н.В.* Циркуляция атмосферы над Западной Сибирью // Метеорология и гидрология. 2007. № 5. С. 28–36.
14. *Поднебесных Н.В.* Динамика циклонической и антициклонической активности над Сибирью : автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Томск, 2010. 22 с.
15. *Иванова А.С.* Опасные явления погоды на территории Иркутской области в современный период : автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Казань, 2011. 24 с.

**ОЦЕНКА БАЛАНСА МЕТАНА
В САЯНО-ШУШЕНСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ
ЗА ТРЕХЛЕТНИЙ ЦИКЛ НАБЛЮДЕНИЙ
2021–2023 ГОДОВ**

Д.В. Мишин^{1,2}, А.А. Строков^{2,3}, И.А. Репина¹

¹ *Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва*

² *Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова,
Москва*

³ *Российский университет дружбы народов (РУДН), Москва*

В работе представлены результаты оценки баланса парникового газа метана в Саяно-Шушенском водохранилище на р. Енисей в Сибири. Было организовано пять полевых выездов в разные фазы водного режима 2021–2023 гг., в рамках которых изучались гидрологические особенности водохранилища и особенности распределения метана по акватории. Концентрации метана в водной толще Саяно-Шушенского водохранилища не превышали $1 \text{ мклCH}_4 \text{ л}^{-1}$, удельный поток метана — $2 \text{ мгCH}_4 (\text{м}^2 \text{сут})^{-1}$ за исключением летней экспедиции 2023 г., где отмечалось повышенное по сравнению с другими периодами содержание метана (концентрация $5,66 \text{ мклCH}_4 \text{ л}^{-1}$ и удельный поток $5,3 \text{ мгCH}_4 (\text{м}^2 \text{сут})^{-1}$). Результаты расчета баланса метана показали, что во все периоды наблюдений отмечается положительная разница ($2,6\text{--}64,7 \text{ тонн CH}_4 \text{ сут}^{-1}$), что говорит о накоплении (поглощении) метана в водной толще водоема и отрицательной эмиссии (водоем-поглотитель). Сравнение наблюдаемых значений потоков метана с отечественными и зарубежными источниками литературы подтвердили низкую эмитирующую способность водохранилища.

Ключевые слова: метан, водохранилище, концентрация, удельный поток, баланс, эмиссия, поглощение

**ASSESSMENT OF METHANE BALANCE
IN THE SAYAN-SHUSHENSKOYE RESERVOIR
FOR A THREE-YEAR OBSERVATION
CYCLE 2021–2023**

D.V. Mishin^{1,2}, A.A. Stokov^{2,3}, I.A. Repina¹

¹ *A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics
of the Russian Academy of Sciences, Moscow*

² *N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Moscow*

³ *Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow*

The paper presents the results of assessing the balance of the greenhouse gas methane in the Sayano-Shushenskoye Reservoir on the Yenisei River in Siberia. Five field trips were organized in different phases of the water regime in 2021–2023, during which the hydrological features of the reservoir and the features of methane distribution over the water area were studied. Methane concentrations in the water column of the Sayano-Shushenskoye Reservoir did not exceed $1 \mu\text{LCH}_4 \text{L}^{-1}$, the specific methane flux was $2 \text{ mgCH}_4 (\text{m}^2 \text{day})^{-1}$, with the exception of the summer expedition of 2023, where an increased methane content was noted compared to other periods (concentration of $5.66 \mu\text{LCH}_4 \text{L}^{-1}$ and specific flux of $5.3 \text{ mgCH}_4 (\text{m}^2 \text{day})^{-1}$). The results of the methane balance calculation showed that in all observation periods there is a positive difference (2.6–64.7 tons of $\text{CH}_4 \text{day}^{-1}$), which indicates the accumulation (absorption) of methane in the water column of the reservoir and negative emission (reservoir-absorber). Comparison of the observed values of methane flows with domestic and foreign literature sources confirmed the low emitting capacity of the reservoir.

Keywords: methane, reservoir, concentration, specific flow, balance, emission, absorption

1. Введение

В 2023 г. Институтом физики атмосферы им. Обухова РАН (ИФА РАН) совместно с соисполнителями (ФГБУ «ГОИН», МГУ) по заказу ПАО «РусГидро» (Договор № 1010-416-2021 на тему «Измерение выбросов парниковых газов и оценка поглощающей способности гидроэнергетических объектов») завершен трехлетний (2021–2023) цикл работ по измерению ба-

ланса парникового газа метана (CH_4) на водохранилищах РФ в разных климатических зонах. В настоящей статье приведены результаты оценки баланса метана на акватории Саяно-Шушенского водохранилища, расположенного в верхнем течении р. Енисей на территории Республик Тыва и Хакасия, а также Красноярского края, по итогам трехлетнего цикла наблюдений в различные гидрологические фазы водного режима.

Изучению выбросов парниковых газов (углекислого газа CO_2 и метана CH_4) с поверхности водохранилищ мира за последние десятилетия посвящено большое количество работ [1–9]. Подобные работы в России начали появляться в последнее десятилетие и активно проходят только последние несколько лет [10–14]. Оценка выбросов CO_2 и CH_4 с поверхности Саяно-Шушенского (приплотинная часть) и Майнского водохранилищ, образующих Саяно-Шушенский гидроэнергетический комплекс, проводилась в августе 2014 г. [15] и публиковалась в разных изданиях [7, 8]. Современные результаты по эмиссии метана и сопутствующему гидрологическому режиму Саяно-Шушенского водохранилища в период наблюдений отражены в работах коллективов ИФА РАН и ФГБУ «ГОИН» [16–19]. Стоит отметить работы [20, 21] по верхней части водохранилища — Шагонарскому плёсу — интересному гидрологическому объекту.

Цель настоящей работы — оценка баланса метана в Саяно-Шушенском водохранилище в различные фазы водного режима. Расчет баланса проводился по разности приходной и расходной частей, полученных по результатам полевых и камеральных исследований в сезоны 2021–2023 гг. Для достижения цели обозначены и решены следующие задачи:

- оценка приходной части баланса метана (общее содержание в водохранилище, приток с реками);
- оценка расходной части баланса метана (поток с поверхности, окисление, дегазация);
- оценка баланса метана в разные фазы водного режима.

2. Материалы и методы

2.1. Полевые и лабораторные работы

Полевые работы на акватории Саяно-Шушенского водохранилища проводились в разные сезоны и фазы водного режима (всего пять экспедиционных выездов) (рис. 1). Это было необходимо для более точной количественной оценки содержания метана в толще водохранилища в разные по водности годы. Основные параметры водохранилища, а также сезонные характеристики, используемые при расчете потоков метана, представлены в табл. 1 и 2.

Сеть станций (рис. 2) и объем полевых работ в каждом экспедиционном выезде зависели от гидрометеорологических условий и финансовых возможностей, а также от потенциальных природных и антропогенных источников поступления метана (топляки, сельское хозяйство и хозяйственно-бытовые стоки населенных пунктов). В целом охвачена вся акватория водохранилища с плотностью 1 станция наблюдений на 11 км длины водоема. Более плотная сетка станций расположена в верхней (Шагонарский плёс) и нижней (район плотины Саяно-Шушенской ГЭС (СШГЭС)) части водохранилища, менее плотная — в средней части (Саянское ущелье) (табл. 3). Также

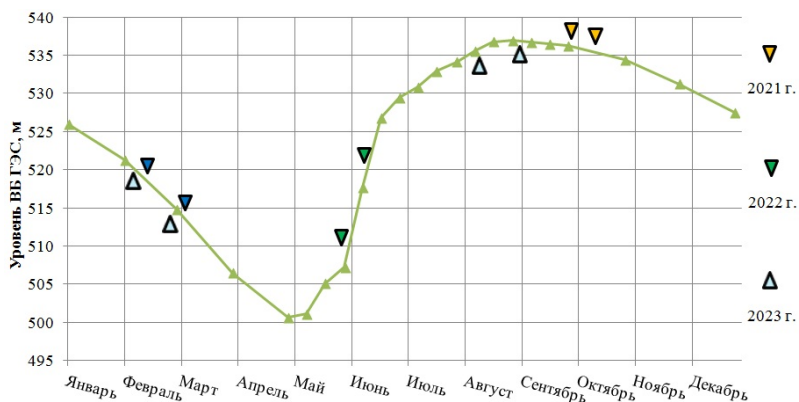


Рис. 1. Распределение сроков экспедиционных выездов относительно годового хода уровня воды Саяно-Шушенского водохранилища

Таблица 1

Общие параметры Саяно-Шушенского водохранилища

Номинальный подпорный уровень (НПУ), м БС	539
Минимальный допустимый уровень (мертвого объёма) (УМО), м БС	500
Форсированный подпорный уровень при пропуске максимального расхода обеспеченностью 0,01 % (ФПУ), м БС	540
Площадь зеркала при НПУ, км ²	608
Площадь зеркала при УМО, км ²	250
Полная статическая ёмкость, км ³ :	
– при ФПУ	31,33
– при НПУ	30,71
– при УМО	16,00
Полезная статическая ёмкость, км ³	
– между ФПУ и НПУ	0,62
– между НПУ и УМО	14,71
Протяжённость водохранилища, км:	
– при НПУ	312
– при УМО	260
Максимальная глубина при НПУ, м	220
Площадь водосбора (в створе СШГЭС), тыс. км ²	179,9

внимание было приковано к крупным притокам водохранилища (Джой и Кантегир) и более мелким (Джойская и Кантегирская Сосновка), которые являются местом «хранения» затонувшей древесины [23–25]. Кроме того, обследованы притоки Казырсуг, Ус, Хемчик, Чаа-Холь и Эйлиг-Хем.

На каждой станции проводился целый комплекс работ, включающий «метановый» и «гидрометеорологический» блок (табл. 4).

«Гидрометеорологический» блок работ включал в себя:

– определение метеорологических параметров (условий) при отборе проб воды и воздуха (температура воздуха, атмосферное давление, скорость ветра, влажность);

Таблица 2

Параметры водохранилища в период полевых работ

Номер и дата экспедиции	Фаза водного режима	Уровень водохранилища, м БС [22]	Площадь водохранилища, км ² [*]	Объем водохранилища, км ³ [*]	Речной приток, м ³ /с [22]	Расход через турбины ГЭС, м ³ /с [22]
№ 1, 23–27.09.2021	Осенний паводок	536	552,6	26,651	1610	2174
№ 2, 21.02–02.03.2022	Зимняя межень	517	312,4	18,561	382	1343
№ 3, 31.05–07.06.2022	Весеннее половодье	512	291,8	17,054	2512	1100
№ 4, 28.02–09.03.2023	Зимняя межень	513	295,3	17,348	335	1207
№ 5, 10–30.08.2023	Летняя межень	536	552,6	26,651	2328	1820

* Ввиду отсутствия на момент написания статьи утверждённых ПИВР, площади и объёмы водохранилища при различных уровнях взяты из разработанной для проекта ЦМР.

– определение гидрофизических параметров (температура воды, электропроводность, содержание растворенного кислорода).

«Метановый» блок работ включал в себя:

– определение концентрации метана ($\text{мклСН}_4\text{л}^{-1}$) в воде и воздухе путем отбора проб;

– определение удельного (на единицу площади) потока метана ($\text{мгСН}_4(\text{м}^2\text{сут})^{-1}$) с поверхности воды методом плавучих камер.

Отбор проб воды на содержание метана проводился с разных горизонтов (поверхность, выше термоклина, ниже термоклина, придонный слой).

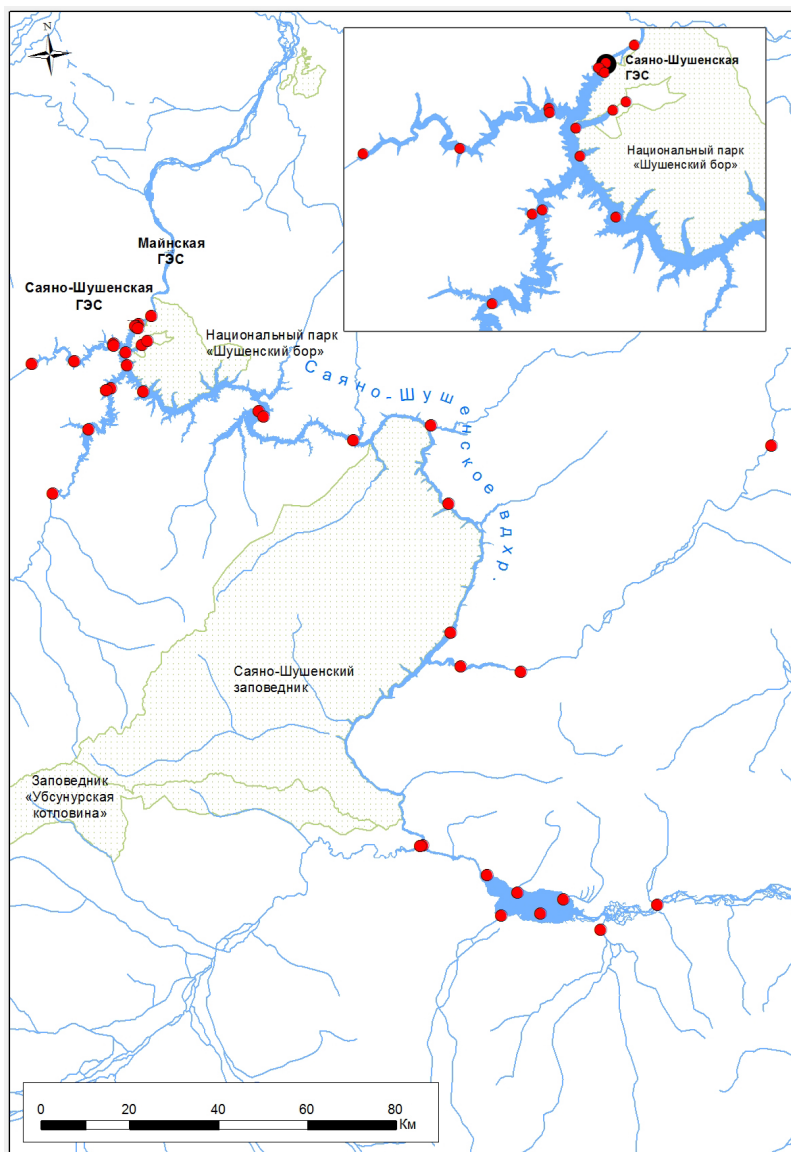


Рис. 2. Карта расположения станций наблюдений за метаном в 2021–2023 гг.

Таблица 3

Основные морфометрические характеристики районов исследования

Основные параметры	Саяно-Шушенское водохранилище	Районы	
		Саянское ущелье	Шагонарский плёс (озеро-видное расширение)
Длина, км	312	260	52
Ширина, км	0,5–12	0,5–3	3–12
Глубина, км	1–220	25–220	1–25
Площадь акватории, км ²	621 (100 %)	359 (58 %)	262 (42 %)

Таблица 4

Приборная база, используемая в период полевых работ, и её применение

Вид работ	Наименование основного экспедиционного оборудования
Измерение физических и гидрохимических показателей водоёма	Многopараметрический зонд SSDA Sea & Sun Technology's CTD48
Измерение основных метеорологических показателей	Портативная метеостанция Kestrel 5000
Отбор проб воздуха	Камеры для сбора эмиссии парниковых газов
	Шприцы и расходные материалы к ним
	Флаконы объемом 50 мл для консервации проб
	Секундомер
Измерение концентрации кислорода	Оксиметр Waterliner WDO-74
Измерения прозрачности воды	Диск Секки озерный для измерения относительной прозрачности воды диаметром 30 см.

Определение концентрации метана в воде происходило в дальнейшем в специально оборудованной лаборатории ИФА РАН. Для выделения искомой величины использовался хроматограф. Через прибор пропусклась отобранная во время экспедиции проба воздуха. В момент непрерывного автоматического измерения содержания газа на экране подключенного к хроматографу компьютера отображалась хроматограмма. По размеру пиков на ней и определялось искомое значение концентрации метана.

В табл. 5 сведены результаты «метанового» блока полевых работ, используемых для балансовых расчетов после обработки проб в лаборатории ИФА РАН.

На протяжении всех экспедиционных выездов концентрация метана в водной толще Саяно-Шушенского водохранилища не превышала $1 \text{ мклCH}_4 \text{ л}^{-1}$, удельный поток метана — $2 \text{ мгCH}_4 (\text{м}^2 \text{сут})^{-1}$, за исключением летней экспедиции 2023 г., где отмечалось повышенное по сравнению с другими периодами содержание метана (концентрация $5,66 \text{ мклCH}_4 \text{ л}^{-1}$ и

Таблица 5

**Результаты измерения метана в водохранилище
(осредненные значения)**

Номер и даты экспедиций	Концентрация метана в поверхностном слое воды, $\text{мклCH}_4 \text{ л}^{-1}$	Удельный поток метана с поверхности воды, $\text{мгCH}_4 (\text{м}^2 \text{сут})^{-1}$
№ 1, 23–27.09.2021	0,31	2,07
№ 2, 21.02–02.03.2022	0,76	0*
№ 3, 31.05–07.06.2022	0,83	1,79
№ 4, 28.02–09.03.2023	0,46	0*
№ 5, 10–30.08.2023	5,66	5,3

* Ледовый покров в зимний период.

удельный поток $5,3 \text{ мгСН}_4 (\text{м}^2 \text{сут})^{-1}$). Ледовый покров в зимние полевые выезды препятствует выделению метана в атмосфере, потому поток не измерялся и был приравнен к 0.

2.2. Расчет баланса метана

При оценке баланса метана в Саяно-Шушенском водохранилище использовался подход, примененный на Рыбинском водохранилище [11], однако без разбиения акватории водохранилища на секции (отсеки). Следует отметить, что в работе авторов [17] предприняты попытки разделить акваторию Саяно-Шушенского водохранилища на пять секций. После проведения дополнительных камеральных работ ожидаются более точные оценки баланса метана в водохранилище в разные сезоны.

Уравнение баланса метана в Саяно-Шушенском водохранилище за 1 сутки ($\text{тоннСН}_4 \text{сут}^{-1}$) имеет вид подобно [11] с изменениями:

$$\begin{aligned} \text{СОДЕРЖАНИЕ}_{t+1} = & \text{СОДЕРЖАНИЕ}_t + \\ & + \text{ПРИТОК С РЕЧНЫМИ ВОДАМИ} - \\ & - \text{ПОТОК С ПОВЕРХНОСТИ} - \\ & - \text{ОКИСЛЕНИЕ} - \text{ДЕГАЗАЦИЯ}. \end{aligned} \quad (1)$$

Баланс состоит из разности приходной (общее содержание и приток с речными водами) и расходной (поток с поверхности в атмосферу, окисление и дегазация через плотину ГЭС). Важная приходная часть баланса — поступление из донных отложений — для Саяно-Шушенского водохранилища видится авторам несущественной ввиду больших глубин (более 200 м) и геологических особенностей ложа. В связи с этим данная приходная часть баланса в работе не учитывалась.

Рассмотрим расчёт каждого элемента баланса более подробно.

Приходная часть. Общее содержание метана в толще водохранилища определялось как произведение средней (по глубинному профилю) концентрации метана ($\text{мклСН}_4 \text{л}^{-1}$) (по полевым данным) и объема водохранилища (км^3) при заданном

уровне (по данным ПАО «РусГидро») в каждый полевой выезд с учетом переводных коэффициентов.

Поступление метана с речными водами притоков определялось как произведение средней концентрации метана в притоках ($\text{мклCH}_4 \text{ л}^{-1}$) (по полевым данным) и расхода боковой приточности ($\text{м}^3 \text{ с}^{-1}$) к водохранилищу (по данным ПАО «РусГидро») в каждый полевой выезд с учетом переводных коэффициентов.

Расходная часть. Поток метана с поверхности водохранилища (эмиссия в атмосферный воздух) определялся как произведение удельного потока метана ($\text{мгCH}_4 (\text{м}^2 \text{ сут})^{-1}$) (по полевым данным камерного метода) и площади водохранилища при заданном уровне (км^2) (по данным ПАО «РусГидро») в каждый полевой выезд с учетом переводных коэффициентов.

Окисление метана было оценено по формуле, полученной для различных озер умеренного пояса [26]. Окисление линейно зависит от концентрации метана [11]:

$$O_{\text{CH}_4} = 0.38C_{\text{CH}_4}. \quad (2)$$

Дегазация метана через плотину СШГЭС рассчитывалась следующим образом. На этапе полевых работ были отобраны пробы воды на метан в верхнем бьефе гидроузла (перед забором воды на гидроагрегаты) и в нижнем бьефе у плотины. Рассчитывалась разница концентраций перед забором на турбину и в нижнем бьефе. Разница эквивалентна выбросу метана в атмосферу при дегазации, как показано в работе [27]. Разница концентраций умножалась на объем воды, прошедший через СШГЭС за период каждой экспедиции (по данным ПАО «РусГидро»).

Положительные значения баланса метана (преобладание приходной части над расходной) характеризуют его накопление (поглощение) в водной толще водоема и отрицательную эмиссию (водоем-поглотитель). В свою очередь отрицательные значения баланса метана (преобладание расходной части) говорят об его выбросе (эмиссии) в атмосферу (водоем-эмитент).

2.3. Сравнение с мировыми базами данных и данными прошлых наблюдений

Сравнение полученных оценок баланса метана в Саяно-Шушенском водохранилище с другими результатами в настоящее время проблематично ввиду фрагментарности прошлых исследований и несоответствия единиц измерения метана (кг, тонны, тыс. тонн CO_2 -эквивалент и др.). Однако авторами сделана попытка сравнить полученные полевые результаты изменения потока метана камерным методом ($\text{мгCH}_4(\text{м}^2\text{сут})^{-1}$) и расчетные значения расходной части метана ($\text{тоннCH}_4\text{сут}^{-1}$) с имеющимися литературными как отечественными [7–9, 14], так и зарубежными [5] источниками.

3. Результаты

3.1. Результаты оценки баланса метана

На рис. 3 и в табл. 6 представлены результаты оценки баланса метана по всем экспедиционным выездам. На общее содержание метана в водохранилище приходится 98,6–99,9 % от приходной части баланса, на речной приток — всего 0,1–1,4 %. Причем роль речного притока увеличивается в летние периоды наблюдений.

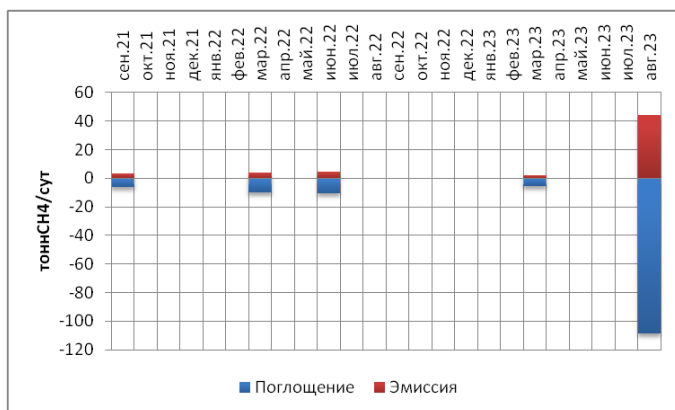


Рис. 3. Суточный поток метана в водохранилище по экспедиционным выездам 2021–2023 гг.

Таблица 6

Результаты оценки баланса метана в водохранилище, тонн CH_4 сут⁻¹

Составляющая	Номер и даты экспедиций				
	№ 1, 23– 27.09. 2021	№ 2, 21.02– 02.03. 2022	№ 3, 31.05– 07.06. 2022	№ 4, 28.02– 09.03. 2023	№ 5, 10– 30.08. 2023
ПРИХОДНАЯ ЧАСТЬ					
Общее содержание	5,907	10,086	10,121	5,706	107,854
Приток с реками	0,046	0,010	0,147	0,012	0,715
<i>Итого по приходной части</i>	<i>5,953</i>	<i>10,096</i>	<i>10,268</i>	<i>5,717</i>	<i>108,569</i>
РАСХОДНАЯ ЧАСТЬ					
Поток с поверхности	1,144	0,000	0,522	0,000	2,929
Окисление	2,245	3,833	3,846	2,168	40,984
Дегазация	0,000	0,000	0,000	0,011	0,000
<i>Итого по расходной части</i>	<i>3,389</i>	<i>3,833</i>	<i>4,368</i>	<i>2,179</i>	<i>43,913</i>
БАЛАНС (разница приходной и расходной части)	2,6	6,3	5,9	3,5	64,7

На окисление метана приходится 66,2–100 % от расходной части баланса, на эмиссию в атмосферу и дегазацию через турбины ГЭС — оставшиеся 0–33,8 %. При этом в зимние периоды поток метана с поверхности водохранилища отсутствовал ввиду ледяного покрова, а в летние периоды наблюдалась нулевая дегазация метана через турбины ГЭС.

3.2. Результаты сравнения потоков метана с другими источниками

Сравнение значений удельных потоков метана по результатам наших экспедиций с другими отечественными и зарубежными источниками показано в табл. 7. Для сравнения был

Таблица 7

**Сравнение полученных удельных потоков метана в нижней части
Саяно-Шушенского водохранилища с литературными данными**

Удельный поток, $\text{мгCH}_4 (\text{м}^2\text{сут})^{-1}$	По собственным данным ИФА РАН			По дан- ным [8] за 2014 г.	По дан- ным [5]
	2021	2022	2023		
Средний	2,07	1,79	0,86	1,12	20
Минимальный	0,08	0,06	0,32	0,48	10
Максимальный	6,91	7,06	2,21	2,02	30

Таблица 8

**Сравнение полученных годовых потоков метана в Саяно-Шушенском
водохранилище с литературными данными**

Поток метана, $\text{тоннCH}_4 \text{ год}^{-1}$	По собственным данным ИФА РАН, 2021–2023	По данным [9]	По данным [14]*
Средний	3715	3629	16435
Минимальный	1237	328	492
Максимальный	8412	9869	48076

* Пересчет из CO_2 -эквивалента.

принят нижний участок водохранилища, ограниченный расстоянием 100 км от плотины СШГЭС.

Сравнение значений годовых потоков метана по результатам собственных экспедиций и литературных данных по субъектам РФ (Республики Тыва и Хакасия, Красноярский край), в которых расположено водохранилище, представлено в табл. 8.

4. Обсуждение

Результаты расчета баланса метана показали, что во все периоды наблюдений отмечается положительная разница, что говорит о его накоплении (поглощении) в водной толще водоема и отрицательной эмиссии (водоем-поглотитель). Интенсивность накопления оказалась минимальна в зимние пе-

риоды (3,5–6,3 тонн CH_4 сут⁻¹), максимальна в летние периоды (64,7 тонн CH_4 сут⁻¹).

Сравнение средних значений удельного потока метана с данными 2014 г. показало хорошую сходимость результатов (разница в 1,4 раза). Сравнение с мировыми базами данных показало серьезную разницу (в 10–23 раза), что говорит об очень низкой эмиссионной способности Саяно-Шушенского водохранилища.

Сравнение средних годовых потоков метана с данными [9] показало очень хорошую сходимость результатов. В то же время сравнение с региональными данными из монографии [14] показало разницу, достигающую 4,4 раза. В данном случае была подтверждена более низкая эмитирующая способность водохранилища по результатам собственных измерений. Также следует учитывать региональный характер расчетов в литературных источниках, то есть поток метана из водохранилищ «растянут» по всему региону и характеризует все пресноводные водоемы на территории конкретного субъекта РФ.

5. Заключение

Вышеуказанные результаты расчетов баланса метана по результатам собственных исследований ИФА РАН в 2021–2023 гг. подтверждают роль Саяно-Шушенского водохранилища как водоема-поглотителя парникового газа метана.

Заделом на будущее могут являться более четкое районирование акватории водохранилища (предварительно авторами выделено пять секций) по зонам метаногенеза и более точная оценка составляющих баланса метана в каждой секции и водохранилище в целом в разные сезоны года и водного режима.

Благодарности

Авторы признательны ПАО «РусГидро» за возможность провести разносторонние научные исследования и оценить эмиссию и поглощение парникового газа метана в Саяно-Шу-

шенском водохранилище на р. Енисей. Также авторы благодарны сотрудникам Саяно-Шушенской ГЭС, администрации Саяно-Шушенского биосферного заповедника за внимание и помощь в организации полевых работ на акватории водохранилища.

Литература

1. *Bastviken D., Cole J., Pace M., Tranvik L.* Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate // *Global Biochem. Cycles*. 2004. Vol. 18, No. 4. DOI: 10.1029/2004GB002238
2. *Bastviken D., Santoro A.L., Marotta H., Pinho L.Q., Calheiros D.F., Crill P., Enrich-Prast A.* Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling // *Environ Sci. Technol.* 2010. Vol. 44, No. 14. P. 5450–5455. DOI: 10.1021/es1005048
3. *Miller B., Arntzen E., Goldman A., Richmond M.* Methane ebullition in temperate hydropower reservoirs and implications for US policy on greenhouse gas emissions // *Environ Managet.* 2017. Vol. 60, No. 4. P. 615–629. DOI: 10.1007/s00267-017-0909-1
4. *Beaulieu J.J., Balz D.A., Birchfield M.K. et al.* Effects of an experimental water-level drawdown on methane emissions from a eutrophic reservoir // *Ecosystems*. 2018. Vol. 21. P. 657–674. DOI: 10.1007/s10021-017-0176-2
5. *Rosentreter J.A., Borges A.V., Deemer B.R. et al.* Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources // *Nature Geoscience*. 2021. Vol. 14, No. 4. P. 225–230.
6. *Narvenkar G., Naqvi S.W.A., Kurian S. et al.* Correction to: Dissolved methane in Indian freshwater reservoirs // *Environ Monit Assess.* 2021. Vol. 193. Article No. 217. DOI: 10.1007/s10661-021-08983-6
7. *Елистратов В.В., Масликов В.И., Сидоренко Г.И., Молодцов Д.В.* Выбросы парниковых газов с водохранилищ ГЭС: анализ опыта исследований и организация проведения экспериментов в России // *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*. 2014. № 11 (151). С. 146–159.
8. *Fedorov M.P., Elistratov V.V., Maslikov V.I. et al.* Reservoir greenhouse gas emissions at Russian HPP // *Power Technology and Engineering*. 2015. Vol. 49, No. 1. P. 33–39. DOI: 10.1007/s10749-015-0569-3

9. *Гречушникова М.Г., Школьный Д.И.* Оценка эмиссии метана водохранилищами России // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2019. № 2. С. 58–71.
10. *Репина И.А., Терский П.Н., Горин С.Л. и др.* Натурные измерения эмиссии метана на крупнейших водохранилищах России в 2021 г. Начало масштабных исследований // Водные ресурсы. 2022. Т. 49, № 6. С. 713–718. DOI: 10.31857/S0321059622060141
11. *Аверина А.А., Антипов Н.Е., Виногоров А.А. и др.* Оценка общего содержания метана в Рыбинском водохранилище в зимний период и расчет отдельных составляющих баланса метана // Исследования молодых географов : Сборник статей участников зимних студенческих экспедиций / под ред. М.С. Савоскул, Н.Л. Фроловой. М. : Издатель Ерхова И.М., 2022. С. 71–80.
12. *Гречушникова М.Г., Репина И.А., Горин С.Л., Степаненко В.М., Василенко А.Н., Григорьев В.Ю., Казанцев В.С., Лисина А.Н., Ломов В.А., Мишин Д.В., Сазонов А.А., Терский П.Н., Тимошенко А.А., Фролова Н.Л.* Натурные исследования условий формирования и эмиссии метана на нескольких крупнейших водохранилищах России // Эмиссия парниковых газов сегодня и в геологическом прошлом: источники, влияние на климат и окружающую среду : Сборник тезисов международной научно-исследовательской конференции GREG 2022, Казань, 31 октября – 2 ноября 2022 г. Казань : Казан. фед. ун-т, 2022. С. 15.
13. *Казанцев В.С., Кривенко Л.А., Дворников Ю.А. и др.* Эмиссия метана из озер севера Западной Сибири // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59, № 3. С. 309–321. DOI: 10.31857/S0002351523030057
14. Оценка потоков парниковых газов в экосистемах регионов Российской Федерации / под ред. А.А. Романовской. М. : ИГКЭ ; ООО «Принт», 2023. 343 с.
15. Обоснование параметров строящихся и эксплуатируемых водохранилищ ГЭС ОАО «РусГидро» по выбросам парниковых газов. Этап 2: Проведение натурных измерений величин выбросов парниковых газов, выделяющихся с поверхности водохранилищ пилотных ГЭС. Разработка методики измерения парниковых газов на водохранилищах ГЭС России с применением руководства ИНА: Отчет о НИР. ФГАОУ ВО «СПбПУ»; рук. Елистратов В.В. Санкт-Петербург, 2014. 91 с.
16. *Репина И.А., Мишин Д.В., Тимошенко А.А. и др.* Специализированный мониторинг параметров гидрологического режима Саяно-Шушенского водохранилища // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии : материалы IV Всероссий-

- ской научной конференции с международным участием, Барнаул, 29 августа – 03 сентября 2022 г.: в 3-х т. Т. 3. Барнаул : ООО «Пять плюс», 2022. С. 158–165.
17. *Репина И.А., Мишин Д.В., Строков А.А. и др.* Особенности пространственно-временного распределения метана в водной толще Саяно-Шушенского водохранилища по результатам полевых исследований 2021–2022 гг. // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов : Труды IX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Пермь, 25–28 мая 2023 г. Пермь : Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2023. С. 128–132.
 18. *Горелиц О.В., Ракчеева Е.А., Тимошенко А.А. и др.* Особенности гидрологического режима Саяно-Шушенского водохранилища в 2021–2022 гг. // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов : Труды IX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Пермь, 25–28 мая 2023 г. Т. 1. Пермь : Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2023. С. 29–33.
 19. *Мишин Д.В., Горелиц О.В., Ильяшенко Е.Ф. и др.* Характерные особенности зимнего режима Саяно-Шушенского водохранилища // Водные ресурсы в условиях глобальных вызовов: экологические проблемы, управление, мониторинг : сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Ростов-на-Дону, 20–22 сентября 2023 г.: в 2-х т. Т. 1. Новочеркасск : ООО «Лик», 2023. С. 295–300.
 20. *Кальная О.И.* Геоэкологические условия и особенности функционирования Шагонарского плёса Саяно-Шушенского водохранилища: специальность 25.00.36 «Геоэкология (по отраслям)» : дисс. ... канд. геогр. наук. Кызыл, 2013. 171 с.
 21. *Кальная О.И., Аюнова О.Д.* Особенности функционирования Шагонарского плеса Саяно-Шушенского водохранилища и его влияние на экологическое состояние окружающей среды // Фундаментальные исследования. Географические науки. 2014. № 12-7. С. 1452–1462.
 22. Официальный сайт ПАО «РусГидро». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sshges.rushydro.ru> (Дата обращения 28.05.2024).
 23. Саяно-Шушенский гидроузел на р. Енисей. Водохранилище. Рекультивация береговой свалки древесных остатков и плавника: рабочий проект. СПб. : ОАО «Инженерный центр ЕЭС», 2005.
 24. *Мухин В.А., Воронин П.Ю., Хононзон Г.А. и др.* Эмиссия метана из живой стволовой древесины // Леса России и хозяйство в них. 2010. № 1 (35). С. 16–21.

25. Жерелина И.В., Быковская И.Н. Опыт извлечения из Саяно-Шушенского водохранилища древесного хлама и его захоронения // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии : Труды III Всероссийской научной конференции с международным участием (в четырех томах), Барнаул, 28 августа – 1 сентября 2017 г. Т. III. Барнаул : ФГБУ «ИВЭП СО РАН, 2017. С. 197–208.
26. Striegl R.G., Michmerhuizen C.M., Hydrologic influence on methane and carbon dioxide dynamics at two northcentral Minnesota lakes // Limnol. Oceanogr. 1998. Vol. 43, No. 7. P. 1519–1529. DOI: 10.4319/lo.1998.43.7.1519
27. Kemenes A., Melack J., Forsberg B. Downstream emissions of CH₄ and CO₂ from hydroelectric reservoirs (Tucuruí, Samuel, and Curuá-Una) in the Amazon basin // Columbia: Inland Waters. 2016. Vol. 6, No. 3. P. 295–302. DOI: 10.1080/IW-6.3.980

Научное издание

ТРУДЫ
СИБИРСКОГО РЕГИОНАЛЬНОГО
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬНОГО
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Выпуск 109

ПРОБЛЕМЫ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ,
ЭКОЛОГИИ, КЛИМАТА СИБИРИ

Технический редактор, корректор *Е.В. Иванова*

Подписано в печать 23.09.2025.

Формат 60×90/16. Уч.-изд. л. 14,5. Усл. печ. л. 21.

Тираж 300 экз. Заказ № 198

Сибирское отделение РАН
630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 17
Отпечатано в Сибирском отделении РАН,
630090, Новосибирск, Морской просп., 2
Тел. +7 (383) 330-84-66, e-mail: e.lyannaya@sb-ras.ru

ISBN 978-5-6052503-0-2



Труды СибНИГМИ. 2025 г. Вып. 109. 1—336.