

## МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА ИСПАРЕНИЯ С ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

С.А. Иванова<sup>1</sup>, А.С. Боронина<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ФГБУ «Государственный гидрологический институт»,  
Санкт-Петербург

<sup>2</sup> 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. Использованы доступные в базе данных ФГБУ «ГГИ» 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. Ivanova<sup>1</sup>, A.S. Boronina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> State Hydrological Institute, Saint Petersburg

<sup>2</sup> 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 водобезопасности 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 ГИ-3000.

Станции, оборудованные стандартным испарителем ГИ-3000 и наземным испарительным бассейном  $20\text{ м}^2$ , 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.

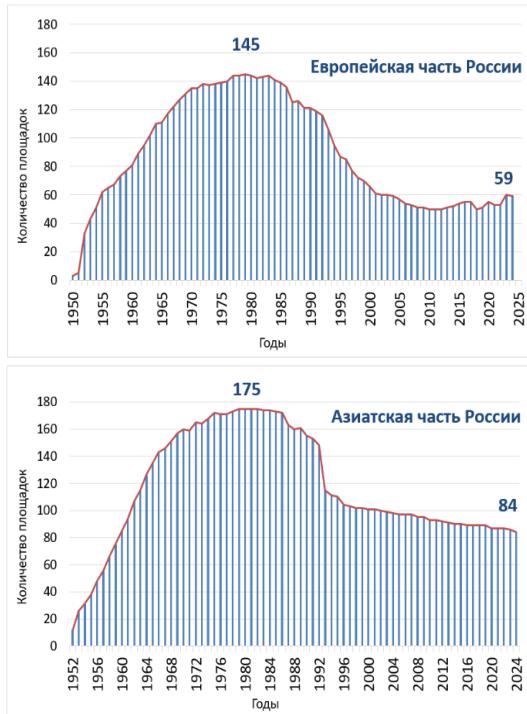
Региональные станции с площадками I типа были предназначены для наблюдений за испарением вблизи конкретных водоемов и на самих водоемах с целью изучения физических основ и основных факторов процесса испарения, а также разработки методов расчета испарения с водной поверхности при отсутствии непосредственных наблюдений. Наряду со стандартным сетевым испарителем ГИ-3000 и испарительным бассейном  $20\text{ м}^2$ , они оснащались испарительным бассейном  $100\text{ м}^2$ , 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  $20\text{ м}^2$ , около 40 плавучих 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 плавучий 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–бюretка 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 —  $20\,518\text{ км}^2$ . Сезонное испарение слоя воды в 5,3 см с такой площади дает объём воды, равный примерно  $1,09\text{ км}^3$ , что соизмеримо с такими затратами объемов как, к примеру, на орошение или забор на питьевые и хозяйствственные 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–бюretка 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.



a



6

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

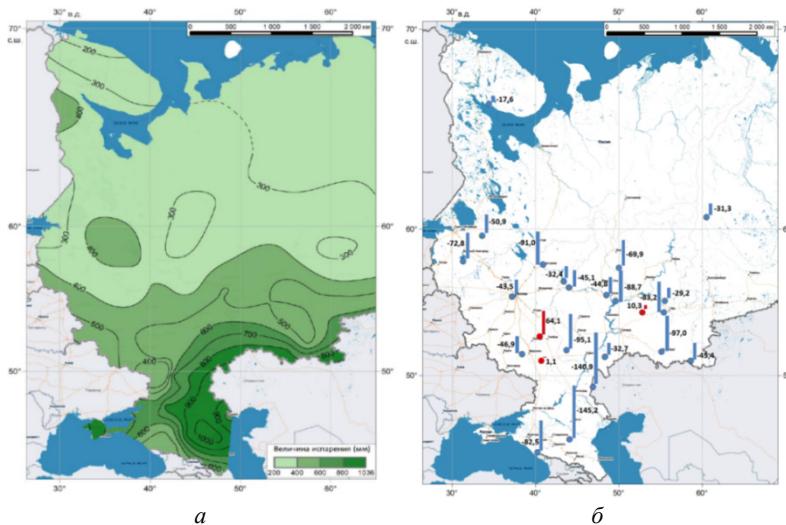


Рис. 2. Карта распределения величин сезонного испарения с водной поверхности по данным испарителя ГГИ-3000 (а); изменения сезонных величин испарения в современный период по сравнению с базовым (%) по данным наземного испарителя ГГИ-3000 (б). Величина столбца соответствует величине изменения испарения (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 растет 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 теплый период. А абсолютные значения линейного тренда возрастили 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 водоиспарительной 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 м<sup>2</sup> 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 теплый 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  $20\text{ m}^2$  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

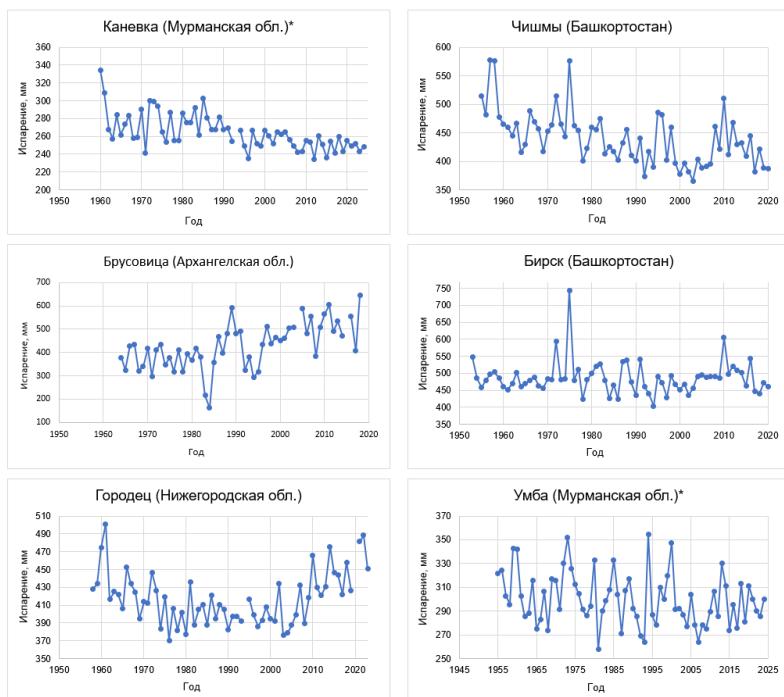


Рис. 3. Примеры многолетних изменений суммарных величин испарения, приведенных к  $20\text{ m}^2$  бассейну, европейская территория России  
(\* сезонные суммы величин испарения приведены за июнь–сентябрь)

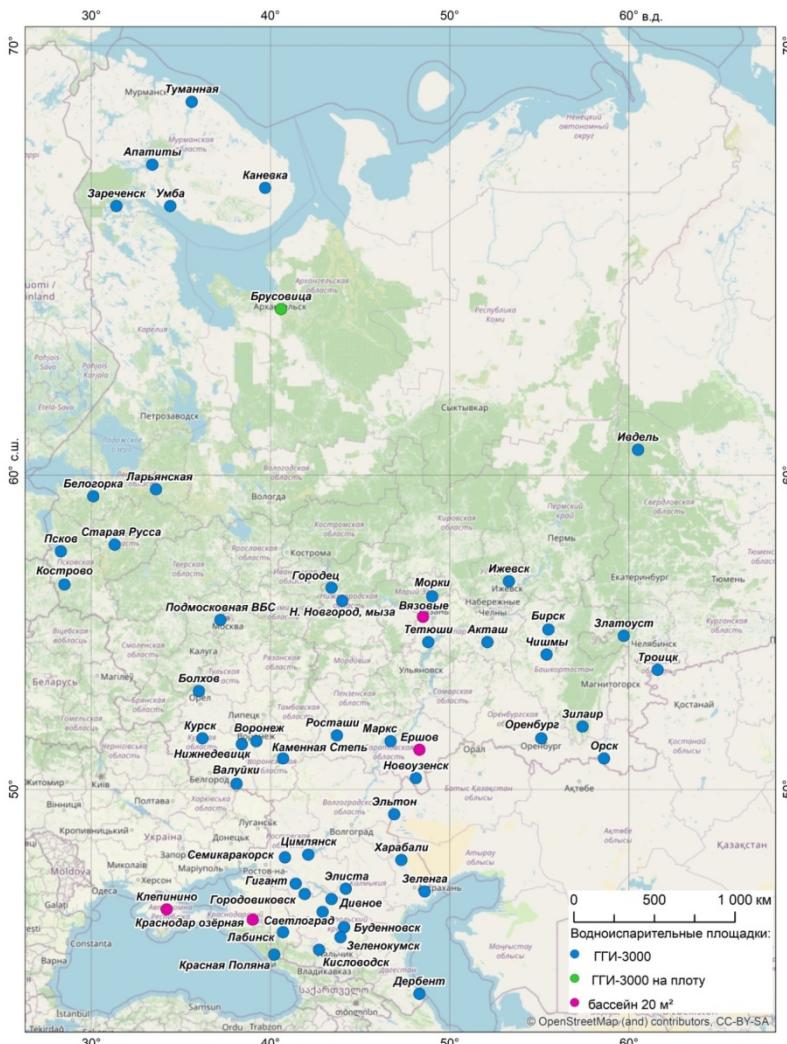


Рис. 4. Водноиспарительные площадки ЕТР, использованные в анализе тенденций испарения в последние десятилетия (синий — ГИ 3000, зеленый — ГИ 3000 на плоту, малиновый — 20 м<sup>2</sup> бассейн)

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

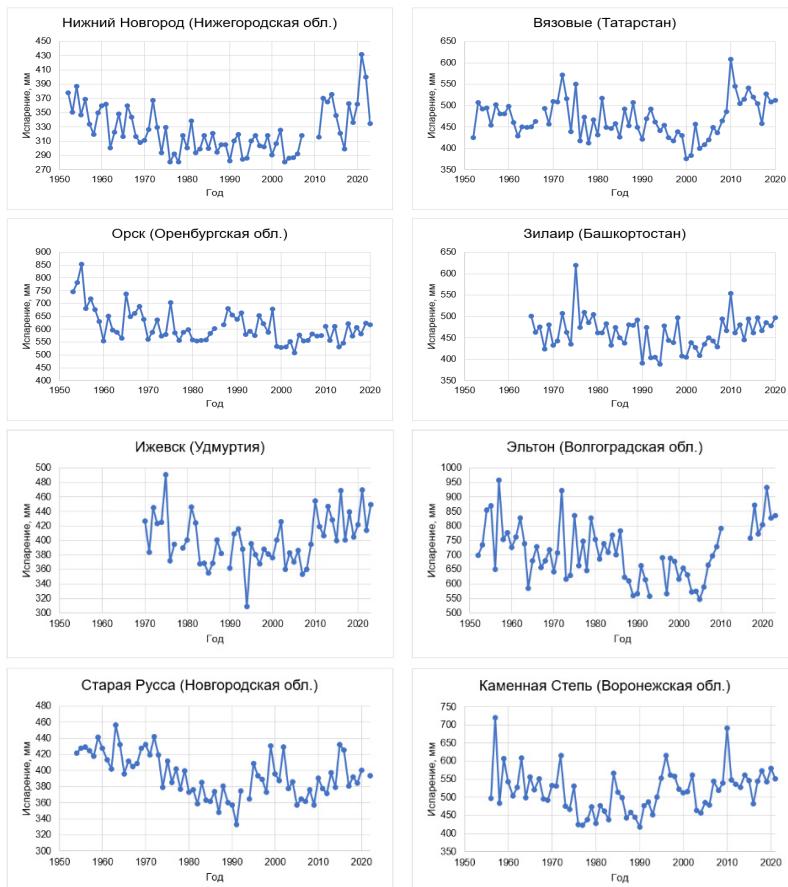


Рис. 5. Примеры многолетних изменений суммарных величин испарения, приведенных к  $20 \text{ м}^2$  бассейну, с тенденциями роста испарения последние десятилетия

(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).

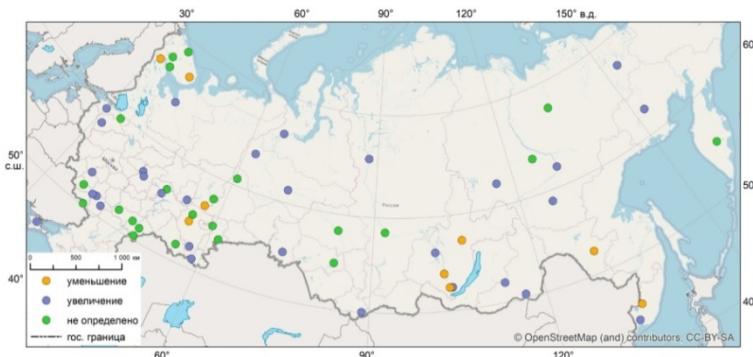


Рис. 6. Тенденции многолетнего хода испарения последних десятилетий



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 водоиспарительной сети Росгидромета выявлена значительная неоднородность в тенденции хода испарения в последние годы. Часть ее объясняется, по всей видимости, локальными особенностями условий, определяющих величину

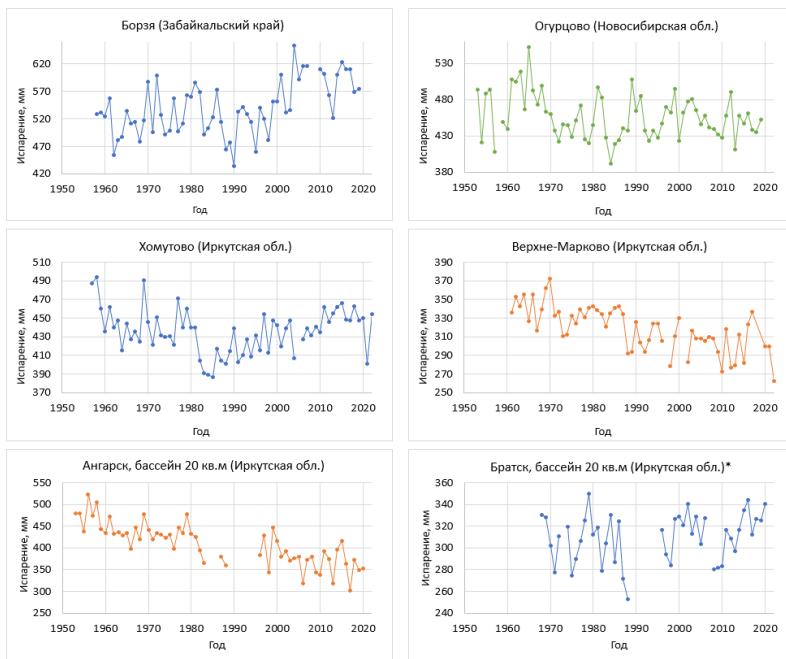


Рис. 8. Примеры многолетних изменений суммарных величин испарения, приведенных к 20 м<sup>2</sup> бассейну, азиатская территория России (\* сезонные суммы величин испарения для Братска здесь приведены за июнь–октябрь)

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 неопределенная 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 водоиспарительных 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 / ФГБУ «ГГИ». 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 «ГГИ»; Книга 1. Шифр темы 2.2 раздел 2.2.1 подраздел 2.2.1.1. Рег. № НИОКР: 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 водоиспарительной 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 ГГИ. 1983. Вып. 289. С. 69–76.