



Научная статья

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИК ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СРОКОВ ЛЕДОВЫХ ЯВЛЕНИЙ НА РЕКЕ СЫРДАРЬЯ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Серик Б. Саиров¹ к.г.н, ассоциированный профессор , Турсын А. Тілләкәрім¹ PhD ,
Бота Б. Айтымова¹ , Мариям Қ. Нұрхан^{1,2*} 

¹ РГП «Казгидромет», Астана, Казахстан; sairov_s@meteo.kz (СБС), tillakarim_t@meteo.kz (ТАТ), aitymova_b@meteo.kz (ББА), nurkhan_m@meteo.kz (МКН)

² Евразийский Национальный Университет имени Л.Н.Гумилева, Астана, Казахстан; nurkhan_m@meteo.kz (МКН)

*Автор корреспонденции: Мариям Қ. Нұрхан, nurkhan_m@meteo.kz

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

вскрытие,
ледостав,
статистический метод,
среднесуточные
температуры воздуха,
Казахстан

АБСТРАКТ

В работе представлены результаты обновления методик прогнозирования сроков вскрытия, появления первых ледовых явлений и установления ледостава на реке Сырдарья в пределах Казахстана, полученных методом регрессионного анализа и их апробация. Наибольшее практическое значение имеют прогнозы сроков образования и разрушения льда, которые востребованы широким кругом потребителей. Также прогнозирование сроков установления и разрушения ледостава на р. Сырдарья позволяет оперативно регулировать попуски из Шардаринского водохранилища и тем самым рационально управлять водными ресурсами региона. Особую актуальность такие прогнозы имеют для створов у пгт. Тасбугет и г. Казалинск, расположенных ниже водохранилища. На основе анализа гидрометеорологических данных р. Сырдарья выполнено прогнозирование сроков вскрытия и начала ледовых явлений. Установлено, что использование предиктора «дата перехода максимальной температуры через 0 °С обеспечивает высокую точность прогнозов (погрешность 2...4 дня), а для первых ледовых явлений отмечено практически полное совпадение с фактическими данными и позволяют достигать необходимой заблаговременности (8...12 дней), что повышает их практическую значимость для гидропрогнозной службы.

По статье:

Получено: 06.10.2025

Пересмотрено: 06.10.2025

Принято: 06.10.2025

Опубликовано: 08.10.2025

1. ВВЕДЕНИЕ

Работа водного транспорта, гидротехническое и дорожное строительство, прокладка нефте- и газопроводов в географических зонах, где протекают замерзающие реки, требует обеспечения прогнозами ледовых явлений.

Основные виды ледовых прогнозов для рек и водохранилищ включают: прогнозы сроков появления плавучего льда (сала, шуги, осеннего ледохода); прогноз сроков начала ледостава (образование неподвижного ледяного покрова); прогноз нарастания толщины ледяного покрова; прогноз уменьшения толщины и прочности ледяного покрова; прогноз начала и окончания осеннего ледохода; прогноз особых явлений, возникающих при замерзании и вскрытии рек – зажоров и заторов льда.

Все виды прогнозов подразделяются по заблаговременности на краткорочные (с заблаговременностью до 15 суток) и долгосрочные.

Долгосрочные прогнозы, имеющие обычно заблаговременность 1...2 месяца, используются при планировании открытия и закрытия навигации (включая начало и окончание сплава леса), организации и прекращения работы ледяных переправ и

Для цитирования:

Саиров С., Тіллекәрім Т.,
Айтымова Б., Нұрхан М.
Совершенствование
методик прогнозирования
сроков ледовых явлений на
реке Сырдарья в условиях
изменения климата // *Гидрометеорология и
экология*, 119 (4), 2025, 133-
149.

зимников, начала и окончания строительных работ с воды и со льда, мероприятий по пропуску весеннего половодья, по борьбе с зажорами и заторами льда и т.д.

Краткосрочные прогнозы служат для принятия конкретных оперативных решений, связанных с осуществлением перечисленных работ и мероприятий [1]. В основе краткосрочных прогнозов ледовых явлений лежит применение не только приближенных физико-статистических зависимостей, но и строгих решений, основанных на использовании уравнения теплового баланса. Долгосрочные прогнозы ледовых явлений базируются на учете закономерностей развития атмосферных процессов и преемственности их изменения в течение последующего периода времени [2]. В работе Б.А. Апполова, Г.П. Калинина, В.Д. Комарова [3] изданном в 1974 году, изложены наиболее распространенные методы прогнозов ледовых явлений. Однако, за последнее время появились новые разработки в этой области, некоторые методики прогнозирования были уточнены и усовершенствованы.

Основы краткосрочных прогнозов ледовых явлений на реках, озерах и водохранилищах разрабатывались в Гидрометцентре СССР. Значительный вклад в решение этого сложного вопроса внесли исследования С.Н. Булатова, В.В. Пиотровича, Л.Г. Шуляковского [4] и других авторов. Методам прогноза сроков замерзания и вскрытия посвящены работы Гинзбурга Б.М. [5], Солдатовой И.И. [6,7] и Савченко Е.И. [8]. Исследованиями ледовых явлений в низовье Сырдарьи посвящено много работ, из которых следует особо отметить работу В.П. Захарова [9], имеющую обзорный характер.

В Казахстане первые работы по разработке методов прогнозирования сроков начала ледовых явлений, и установления ледостава на исследуемом объекте относятся к 1971 году. Данные исследования заложили основу для дальнейшего совершенствования методических подходов. В последующие годы методика была доработана и обновлена в 2005 году специалистами Управления Гидропрогнозов РГП «Казгидромет» выпущена методическая записка «Методика прогнозирования сроков появления льда, установления ледостава на р. Сырдарья» [10].

В настоящее время потребность в улучшении качества прогнозов сроков начала осенних ледовых явлений и в увеличении заблаговременности сильно возросла. Практика обслуживания органов сельского хозяйства, речного флота показывает большое значение долгосрочного прогноза с заблаговременностью порядка 1...1.5 месяца [11].

Целью данной работы является обновление методики прогнозирования сроков вскрытия, начала ледовых явлений и установления ледостава на реке Сырдарья в условиях меняющегося климата на основе статистических методов прогнозирования.

Для достижения цели выполнены следующие задачи:

- сбор данных и удлинение рядов с целью обеспечения более точных и актуальных прогнозов;
- построение новых зависимостей, используя предикторы, для повышения точности прогноза;
- выбор наиболее эффективных зависимостей с предикторами для создания уравнений, которые были использованы в прогнозировании;
- проведение апробации полученных зависимостей на 2024...2025 гг.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Область исследования

В данной работе прогнозирование сроков вскрытия, первых ледовых явлений и установления ледостава на р. Сырдарья произведены по двум гидрологическим постам: у пгт. Тасбулет и у г. Казалинск.

Ледовый режим на р. Сырдарья в целом отличается неустойчивым характером. В годы с постепенным понижением температуры и отсутствием резких похолоданий сроки появления шуги на различных участках могут различаться более чем на месяц.

Между датами появления ледовых явлений в разных частях реки прослеживается взаимосвязь, однако коэффициенты корреляции остаются относительно невысокими.

Ледостав на р. Сырдарья формируется путем остановки и смерзания в отдельных неподвижных ледяных перемычек, разделенных участками чистой воды, которые в дальнейшем постепенно замерзают, а иногда остаются свободными ото льда или характеризоваться развитием шуговых явления.

Процесс установления ледостава можно схематически разделить на два типа. Первый тип: наблюдается при слабых морозах, когда транзитная шуга длительное время свободно подходит к кромке льда. Происходит медленное движение кромки льда вверх по течению. Второй тип: характерен для резких похолоданий: когда сразу образуется серия ледяных перемычек, что вызывает скачкообразное движение кромки льда вверх по реке. В этом случае большое количество шуги быстро смерзается, формируя прочный ледяной покров.

Сроки установления ледостава колеблются в широких пределах. Строгой последовательности в установлении ледостава по длине реки нет.

Продолжительность периода в году с устойчивым ледоставом на р. Сырдарья составляет в среднем 64...91 дней. Наибольшая продолжительность у пгт. Тасбугет составила 114 дней, у г. Казалинск составила 141 дней. Минимальная продолжительность ледостава в 2016 год 23 дня зафиксировано у ГП пгт. Тасбугет.

В р.Сырдарье, как и в р.Амударье, уровень воды держится высоким от начала ее замерзания до вскрытия. В связи с этим высший (за год) уровень воды чаще всего бывает зимой, а не летом (во время половодья). Так, на Сырдарье у г. Казалинска высший зимний уровень превышал высший летний в 95 %, а у Тюмень-Арыка – в 55% лет наблюдений. В низовьях обеих рек их русла несколько приподняты над окружающей местностью поэтому их выход из берегов нередко сопровождается затоплением населенных пунктов, разрушением транспортных магистралей и других сооружений. Для защиты от наводнений объекты, подверженные затоплению, отгорожены от этих рек дамбами, которые нередко прорываются. На Сырдарье почти каждую зиму имели место выходы воды из берегов, из которых в среднем 7 случаев сопровождалось какими-либо вредными последствиями. Считалось, что опасность выхода реки в зимнее время может быть продиктован заранее с помощью регулирования попусков на плотине Шардаринской ГЭС, так как приточность реки ниже с. Шардары мало. В проекте эксплуатации Шардаринской ГЭС в качестве критических были приняты некоторые определенные расходы в нижнем бьефе водохранилища: большие для периода ледостава и меньшие для периода вскрытия. Предполагалось, что при расходах больших критических в низовьях реки должна возникать опасность выхода реки из берегов и наводнений [12]

В низовьях Сырдарьи температуры воздуха настолько низка, а в верховьях она так высока, что в низовьях река замерзает ежегодно, а верховьях очень редко. Зимой существует такая граница на реке, ниже которой наблюдается ледостав, а выше в зависимости от температуры воздуха или фаза «чисто», или шугоход. Эта граница (или кромка льда, кромка ледостава, как ее называют) не остается на месте, а перемещается по реке: при похолоданиях вверх по течению, а при потеплениях вниз, так что замерзание в отдельном пункте можно рассматривать как подход кромки льда к этому пункту снизу, а вскрытие – как подход ее сверху. Наблюдения на посту Казалинск значительно расходятся с данными других гидропостов. Этот пост находится в нижнем конце заторного участка, поэтому ледостав на нем наступает позже (иногда значительно), чем на вышележащих участках реки [12].

Материалы исследования

В работе использованы данные о ледовых явлениях за период 1980...2021 гг. для ГП у пгт. Тасбугет и за 1969...2021 годы для ГП у г. Казалинск, которые взяты из гидрологических ежегодников [13].

За дату вскрытия принимали первый день подвижки, если после не наступил ледоход, в случае отсутствия подвижки- первый день ледохода. В ежегодных данных о режиме и ресурсах поверхностных вод суши [13] есть случаи, когда подвижка не отмечается, иногда вскрытие наблюдается во время вечернего срока и приводится к следующему дню.

Материалы наблюдений за ледовым режимом по всем гидропостам имеются за весь период наблюдений за исключением отдельных лет, когда вскрытие не происходило, после ледостава сразу устанавливалась чистая вода либо ледовые явления вовсе отсутствовали.

В качестве основных предикторов формирования ледовых явлений использованы метеорологические данные [14] государственной наблюдательной сети по МС Казалинск и Кызылорда (таблица 1).

Таблица 1

Список метеорологических станции

№	Наименование станции	Высота над уровнем моря	Координаты		Годы наблюдений
			Широта	Долгота	
1	Казалинск	66	45° 45'	62° 06'	1936...2022
2	Кызылорда	128	44° 51'	65° 30'	1977...2022

Методика исследования

Одним из широко распространенных методов для прогнозирования временных рядов и выявления зависимостей между климатическими факторами и ледовыми процессами является регрессионный анализ [15...16].

Для описания взаимосвязи между сроками формирования ледовых явлений и метеорологическими характеристиками применён метод линейной регрессии, основанный на предположении о линейной зависимости между датами установления ледовых явлений и соответствующими предикторами (датами перехода среднесуточной температуры воздуха через 0 °С, максимальной температуры через 0 °С и среднесуточной температуры через –5 °С).

Для оценки эффективности воспроизведения методики наблюдаемых данных используются общепринятые статистические критерии: коэффициент корреляции, среднее квадратическое отклонение, процентное системное отклонение, стандартный коэффициент отклонения.

За критерии применимости и качества методики принимается $\bar{S}/\bar{\sigma}$, т.е. отношение средней квадратичной ошибки проверочных прогнозов ($\bar{S}$) к среднему квадратичному отклонению ($\bar{\sigma}$). Также для оценки качества методики необходимо учитывать значение коэффициента корреляции фактически наблюдаемых и прогнозируемых значений (r). Оба этих критерия даны в таблице 2.

Таблица 2

Критерии применимости методики при числе проверочных прогнозов более 25

S/σ	r	Категория качества
≤ 0.50	≥ 0.87	хорошая
0.51...0.80	0.86...0.60	удовлетворительная

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Прогноз вскрытия рек

Сроки появления плавучего льда или начало ледовых явлений, даты образования и вскрытия ледяного покрова меняются от года к году в широком диапазоне, так как тесно связан с погодными условиями.

Вскрытие, зависит главным образом от режима температуры воздуха. Поэтому основным аргументом во всех зависимостях принимаются температурные показатели, в том числе даты перехода через 0°C , за который принимается такой переход, после даты которого без разрыва накапливается сумма положительных температур не менее 15°C . Во всех зависимостях вскрытие увязывались с первым устойчивым переходом. В процессе выявления приемлемых аргументов для зависимостей прогнозирования сроков вскрытия р. Сырдарья были построены зависимости дат вскрытия от следующих факторов:

а) зависимость даты вскрытия ГП от суммы средней суточной температур от перехода через 0°C до вскрытия;

б) зависимость даты расчетного перехода максимальной температуры воздуха через 0°C к положительным значениям, причем такой переход, после которого без перерыва накапливалась сумма положительных температур не менее 15°C .

Сроки вскрытия р. Сырдарья по гидропосту Казалинск (1969...2021 гг.) и Тасбугет (1981...2022 гг.) характеризуются значительной межгодовой изменчивостью и варьируют в пределах от середины января до начала апреля (рисунок 1).

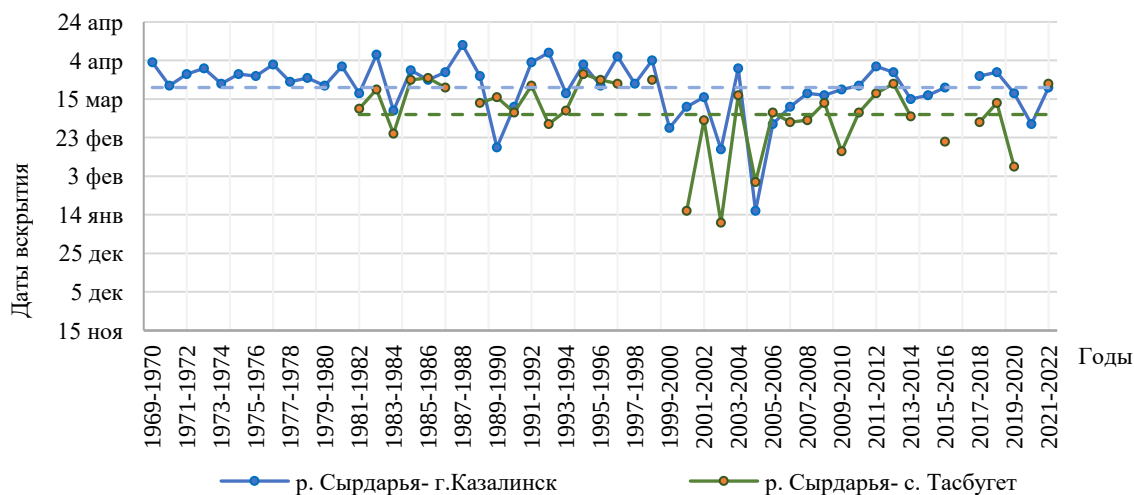


Рисунок 1. График дат сроков вскрытия р. Сырдарья за период 1969...2021 гг.

**примечание: по р.Сырдарья – г.Казалинск за период 2016...2017 гг., ледостав не был установлен. По р.Сырдарья – с.Тасбугет данные имеются с 1981...2022 гг., за периоды 1987...1988,1997...1998, 1999...2000, 2014...2015, 2016...2017, 2020...2021 гг., даты вскрытия в рядах наблюдений отсутствуют, что связано с отсутствием ледостава в зимний период*

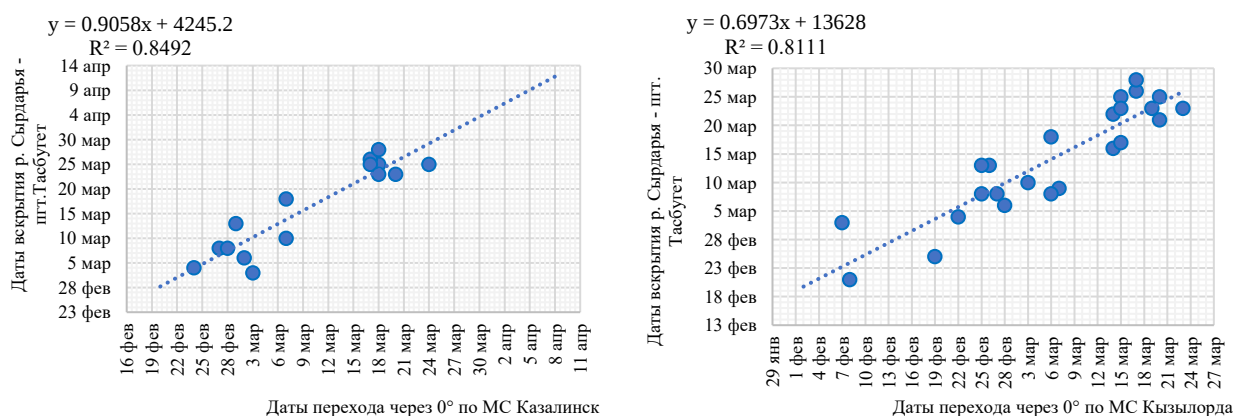
Средние даты вскрытия приходятся на вторую половину марта – начало апреля, при этом на участке Казалинск вскрытие происходит в среднем несколько позже, чем у поста Тасбугет. В разные годы фиксировались как аномально ранние вскрытия (середина января – конец февраля), связанные с мягкими зимами и ранним развитием весеннего стока, так и поздние (первая декада апреля), обусловленные холодными зимами и устойчивым ледоставом.

Связи для прогноза вскрытия рек от дат перехода через 0°C среднесуточных температур

В ранее разработанной «Методике прогнозирования сроков появления льда и установления ледостава на реке Сырдарья» [10] расчёт и прогноз даты вскрытия реки не рассматривались. В настоящей работе такая зависимость построена для участка у пгт. Тасбугет по данным наблюдений метеостанции Казалинск за период 1980...2021 гг. (рисунок 2а), что позволило уточнить закономерности вскрытия реки в современных климатических условиях.

Проведённый анализ зависимостей сроков вскрытия показал высокую степень согласованности расчётных и фактических значений. Так, по данным МС Казалинск для участка у пгт. Тасбугет получена регрессионная зависимость с коэффициентом корреляции 0.92. Допустимая погрешность прогноза составляет ± 6 дней при обеспеченности 93 %, а значение отношения среднеквадратического отклонения к средней ошибке ($S/\delta = 0.39$) подтверждает устойчивость модели. Такие же результаты выявлены по данным МС Кызылорда: коэффициент корреляции составил 0.90 при допустимой погрешности ± 6 дней и обеспеченности 96 %, а величина $S/\delta = 0.73$ указывает на надёжность и практическую применимость зависимости. Таким образом, полученные регрессионные модели могут быть эффективно использованы для краткосрочного прогнозирования сроков вскрытия реки Сырдарья.

а)



б)

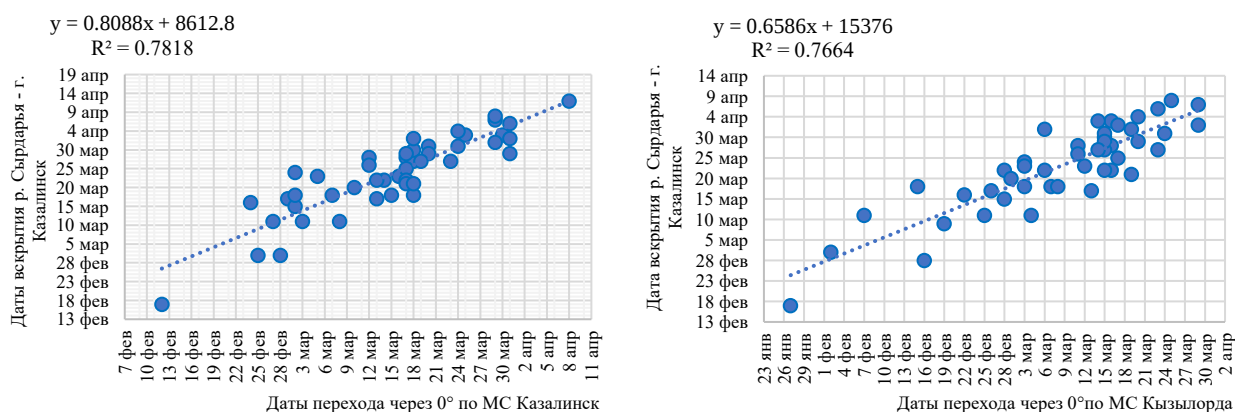


Рисунок 2. Зависимость даты вскрытия ГП р. Сырдарья – пгт. Тасбугет (а) и ГП р. Сырдарья – г. Казалинск (б) от дат перехода среднесуточных температур через 0° по МС Казалинск и МС Кызылорда

Результаты построения зависимости сроков вскрытия р. Сырдарья у г. Казалинск (рисунок 2 б) по данным наблюдений МС Казалинск за 47-летний период свидетельствуют о высокой точности модели: коэффициент корреляции составил 0.88, допустимая погрешность прогноза равна ± 7 дням при обеспеченности 98 %, а значение $S/\delta = 0.46$ подтверждает также ее применимость в целях прогнозирования. Аналогичные характеристики выявлены по наблюдениям МС Кызылорда, на основе которых получена зависимость вскрытия реки в том же створе: коэффициент корреляции также составил 0.88, допустимая погрешность ± 7 дней при обеспеченности 98 %, а показатель S/δ равный 0.48 указывает на стабильность

регрессионной модели. Сопоставимость полученных результатов на основе разных рядов наблюдений подтверждает высокую надёжность и воспроизводимость зависимостей, что обосновывает их практическое использование для краткосрочного прогнозирования сроков вскрытия р. Сырдарья.

Связи для прогноза вскрытия рек от дат перехода через 0°C максимальных температур. Для прогноза даты вскрытия были построены зависимости, которые можно использовать в качестве проверочных к основным зависимостям, для построения их использовались даты расчетного перехода максимальных температур воздуха через 0°C к положительным значениям.

На рисунке 3а представлены зависимости сроков вскрытия р. Сырдарья у пгт. Тасбугет, построенные на основе наблюдений МС Казалинск и МС Кызылорда, которые характеризуются высокой статистической надёжностью и практической значимостью. По данным МС Казалинск получена регрессионная зависимость с коэффициентом корреляции 0.82, допустимой погрешностью прогноза ± 6 суток и обеспеченностью 96 %, при этом значение отношение среднеквадратического отклонения к средней ошибке $S/\delta = 0.58$ подтверждает устойчивость результата. По данным МС Кызылорда получена зависимость с более высоким коэффициентом корреляции 0.88, допустимой погрешностью ± 7 суток и обеспеченностью 96 %, а показатель $S/\delta = 0.48$ указывает на стабильность результатов.

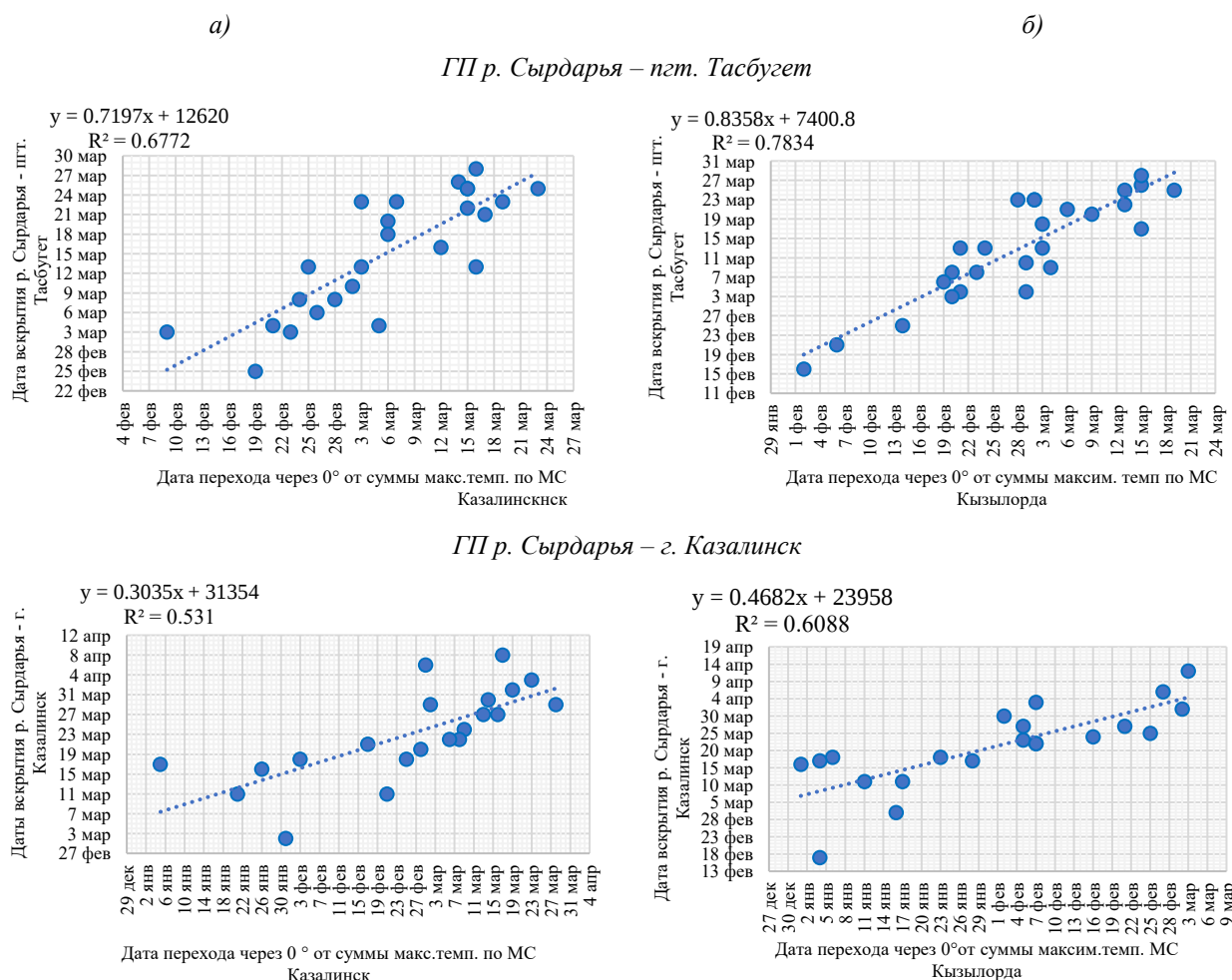


Рисунок 3. Зависимость даты вскрытия ГП р. Сырдарья – пгт. Тасбугет (а) и ГП р. Сырдарья – г. Казалинск (б) от дат перехода максимальных температур через по МС Казалинск и МС Кызылорда

Аналогичные зависимости сроков вскрытия р. Сырдарья у г. Казалинск (рисунок 3б), построенные так же с использованием метеорологических данных МС Казалинск и МС Кызылорда, показали высокую степень статистической значимости и возможность применения для прогностических целей. По данным МС Казалинск получена регрессионная зависимость с коэффициентом корреляции 0.73 при допустимой погрешности ± 6 дней, обеспеченности 95 % и отношение среднеквадратического отклонения к средней ошибке $S/\delta = 0.73$, что подтверждает приемлемый уровень точности. Зависимость, рассчитанная по данным МС Кызылорда, характеризуется коэффициентом корреляции 0.78, допустимой погрешностью ± 8 дней, обеспеченностью 95 % и значением $S/\delta = 0.63$, что свидетельствует об устойчивости модели.

Совокупность полученных результатов демонстрирует воспроизводимость и надёжность подхода, что подчёркивает научную обоснованность разработанных зависимостей и их практическую значимость для краткосрочного прогнозирования сроков вскрытия.

С использованием разработанных уравнений выполнены расчёты прогнозных дат вскрытия реки за весь период наблюдений. Как видно из рисунка 4, рассчитанные значения удовлетворительно согласуются с фактическими данными, что свидетельствует о достоверности полученных зависимостей и устойчивости связи между рассматриваемыми параметрами.

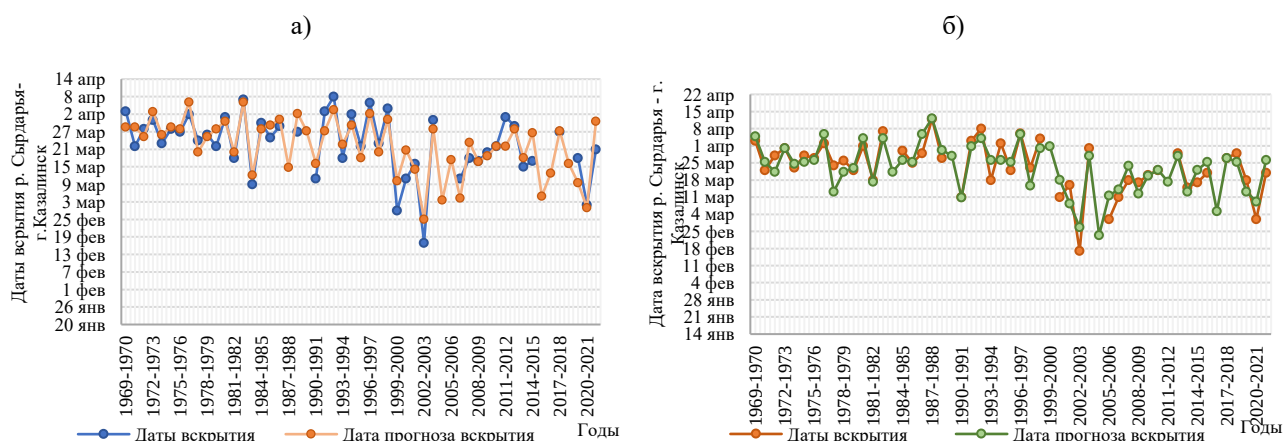


Рисунок 4. График фактических дат вскрытия и прогнозируемых дат по ГП р.Сырдарья – г. Казалинск: а) МС Казалинск; б) МС Кызылорда

В 2025 году на основе полученных зависимостей проведено тестирование уравнений для проверки их работоспособности и прогностической надёжности. Результаты прогнозирования даты вскрытия реки и их фактические сроки вскрытия за тот же период приведены в таблице 3.

Сравнение прогнозных и фактических дат за 2025 год показало следующие результаты:

- по р. Сырдарья – пгт. Тасбугет погрешность прогноза составила $\pm 7...8$ дней, что соответствует допустимым значениям для сезонных прогнозов и может считаться удовлетворительным результатом. Наилучшая точность достигнута при прогнозировании даты перехода максимальных температур через 0°C по МС Казалы, погрешность составила всего +4 дня (фактическая дата – 21 февраля, прогнозная дата – 25 февраля);
- по р. Сырдарья – г. Казалинск погрешность прогноза варьировалась от ± 2 до 9 дней. Особенно точным оказался прогноз даты перехода по средним и максимальным температурам воздуха через 0°C – отклонение составило лишь – 2 дня (фактическая дата - 18 марта, прогнозная дата - 16 марта).

Таблица 3

Прогноз и фактические даты вскрытия льда на 2025 г.

№	Река-пост	МС	Дата перехода через 0 °С сред.температура			Дата перехода через 0 °С макс.температура			Факт
			Уравнение	Дата перехода	Дата прогноза	Уравнение	Дата перехода	Дата прогноза	
1	р.Сырдарья	Казалы	$y = 0.9058x + 4245,2$	06.03	13.03	$y = 0.7197x + 12620$	10.02	25.02	21.02
	-								
	пгт.Тасбугет	Кызылорда	$y = 0.6973x + 13628$	05.03	14.03	$y = 0.8358x + 7400,8$	12.02	28.02	
2	р.Сырдарья	Казалы	$y = 0.8088x + 8612,8$	06.03	16.03	$y = 0.3035x + 31354$	10.02	16.03	18.03
	-								
	г.Казалинск	Кызылорда	$y = 0.6586x + 15376$	05.03	21.03	$y = 0.4682x + 23958$	12.02	27.03	

Прогноз сроков появления льда (появление плавучего льда) и установление ледостава

Установлено, что начала появления первых ледовых явлений на реке соответствует понижению температуры воды в ней до 0 °С и переходу температуры воздуха через эту границу. Причем, между этой датой перехода через 0° и датой появления льда на реке отмечается некоторый промежуток времени, тем больший, чем выше отрицательная температура в эти дни.

На рисунке 5 показана межгодовая изменчивость сроков первых ледовых явлений на р. Сырдарья у г. Казалинск (1969...2021 гг.) и у пгт. Тасбугет (1980...2021 гг.). В среднем ледовые явления у Казалинска наступают в конце ноября, а у Тасбугета - в начале декабря. В отдельные годы фиксировались смещения сроков до января, что связано как с климатическими условиями, так и с влиянием регулирования стока.

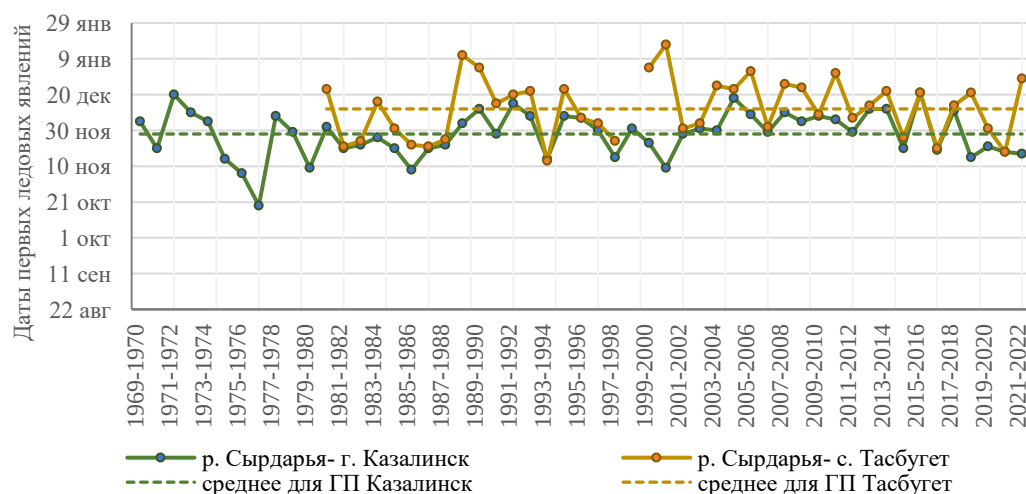


Рисунок 5. График дат первых ледовых явлений р. Сырдарья.

*примечание: по По р.Сырдарья – г.Казалинск данные с 1969...2022 гг., р.Сырдарья – с.Тасбугет данные имеются с 1981...2022 гг., за период 1998...1999 гг. дата первых ледовых явлений не приведены, что связано с отсутствием ледостава

Для получения уравнений с целью прогнозирования дат появления первых ледовых явлений и дат установления ледостава в качестве предикторов были использованы данные даты перехода среднесуточной температуры воздуха через 0 °С и -5 °С по МС Казалинск и Кызылорда.

Анализ построенных зависимостей показал, что наилучшая связь получена между датой перехода среднесуточной температуры воздуха через 0°C и датой появления первых ледовых явлений у створа г. Казалинск. Для прогнозирования дат установления ледостава наиболее надежные результаты показала связь по МС Казалинск.

Связи для прогноза появления первых ледовых явлений на реке от дат перехода через 0° среднесуточных температур. В случае, если по данным МС Казалинск наблюдается переход среднесуточной температуры воздуха через 0°C в сторону понижения, за дату перехода принимается первый день, после которого в течение последующих пяти суток удерживаются отрицательные температуры воздуха. Переход считается устойчивым, если последующий период положительных температур не превышает по продолжительности предшествующий пятидневный период с отрицательными температурами (рис. 6а).

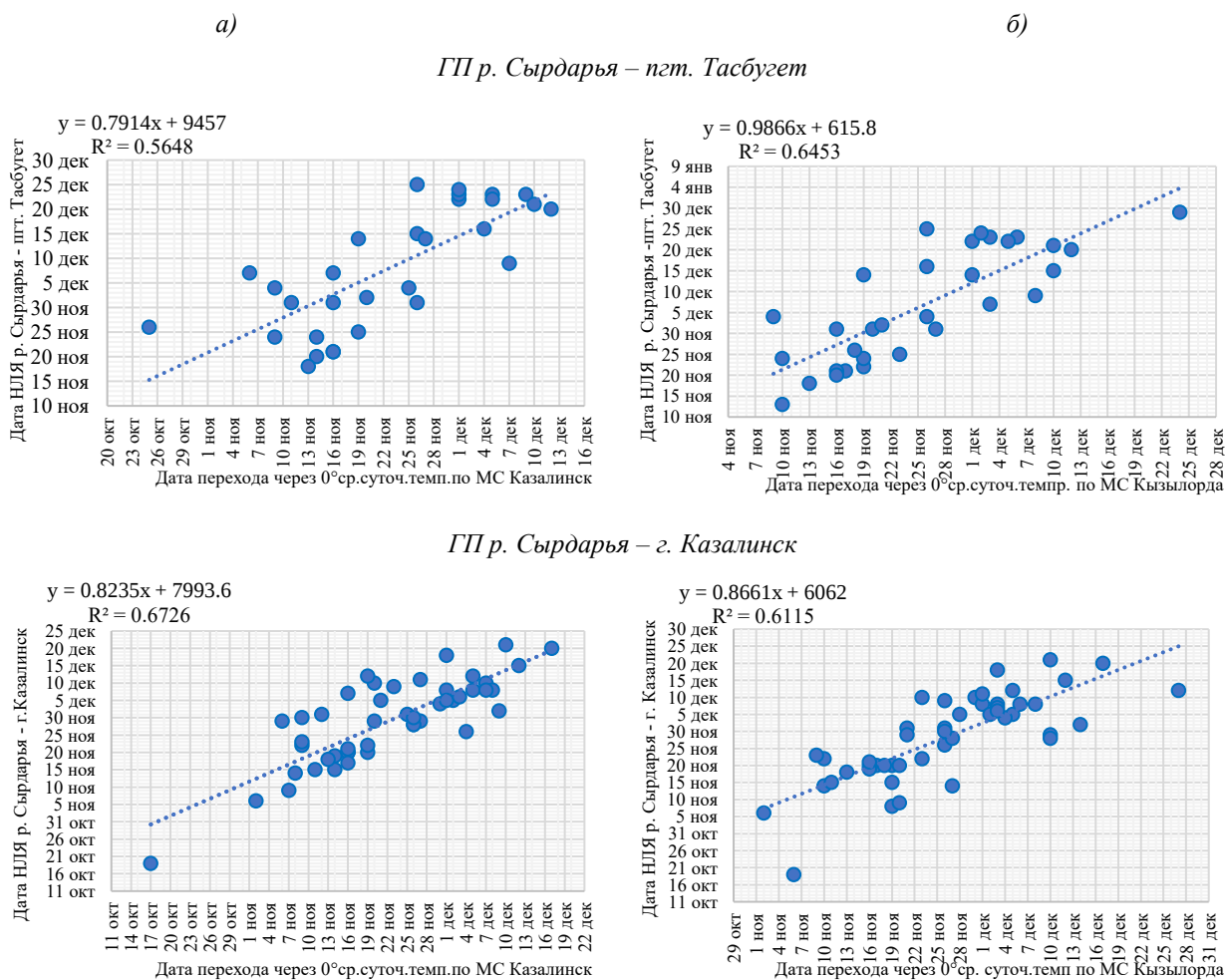


Рисунок 6. Зависимость даты начала ледовых явлений ГП р. Сырдарья – пгт. Тасбугет (а) и ГП р. Сырдарья – г. Казалинск (б) от дат перехода среднесуточных температур через 0° до начала ледовых явлений по МС Казалинск и МС Кызылорда

Для проверки и уточнения прогноза аналогичные зависимости были построены для данного гидропоста с использованием метеорологических данных МС Кызылорда. Схожие зависимости для гидропоста у г. Казалинск приведены на рисунке 6б.

Анализ зависимости даты начала ледовых явлений на р. Сырдарья у пгт. Тасбугет (рис. 6 а) показал, что по данным наблюдений МС Казалинск регрессионная зависимость характеризуется коэффициентом корреляции 0.75 и допустимой

погрешностью прогноза ± 8 суток, при этом отношение среднеквадратического отклонения к средней ошибке ($S/\delta = 1.12$) указывает на удовлетворительную устойчивость зависимости. В то же время по данным МС Кызылорда получена более тесная связь между параметрами (коэффициент корреляции 0.80) при погрешности ± 9 суток и обеспеченности 97 %. Соотношение $S/\delta = 0.62$ подтверждает более высокую устойчивость зависимости, что позволяет рекомендовать её для практического использования при прогнозировании сроков начала ледовых явлений на данном участке реки.

Проведённый анализ зависимости сроков начала ледовых явлений на р. Сырдарья у г. Казалинск (рисунок 6б) показал, что по данным МС Казалинск за период 1969...2021 гг. получена регрессионная зависимость с коэффициентом корреляции 0.82 и обеспеченностью 98 %. Допустимая погрешность прогноза составляет ± 8 суток, при этом отношение среднеквадратического отклонения к средней ошибке ($S/\delta = 0.58$) что подтверждает применимость полученной зависимости для прогноза. Аналогичный расчёт, выполненный по данным МС Кызылорда показал несколько более низкую тесноту связи (коэффициент корреляции 0.78) при обеспеченности 98 % и погрешности ± 9 суток; отношение $S/\delta = 0.63$ также указывает на надёжность полученной зависимости. Таким образом, обе модели могут быть использованы для практического прогнозирования сроков начала ледовых явлений, однако данные МС Казалинск обеспечивают более точный результат благодаря более высокой корреляции и меньшей погрешности.

После построения зависимостей и получения основных уравнений связи, предназначенных для прогнозирования начала ледовых явлений на р. Сырдарья, были выполнены расчёты и построены графики хода фактических и прогнозируемых дат их начала (рисунок 7). Результаты расчётов показали хорошее соответствие прогнозируемых дат фактическим значениям.

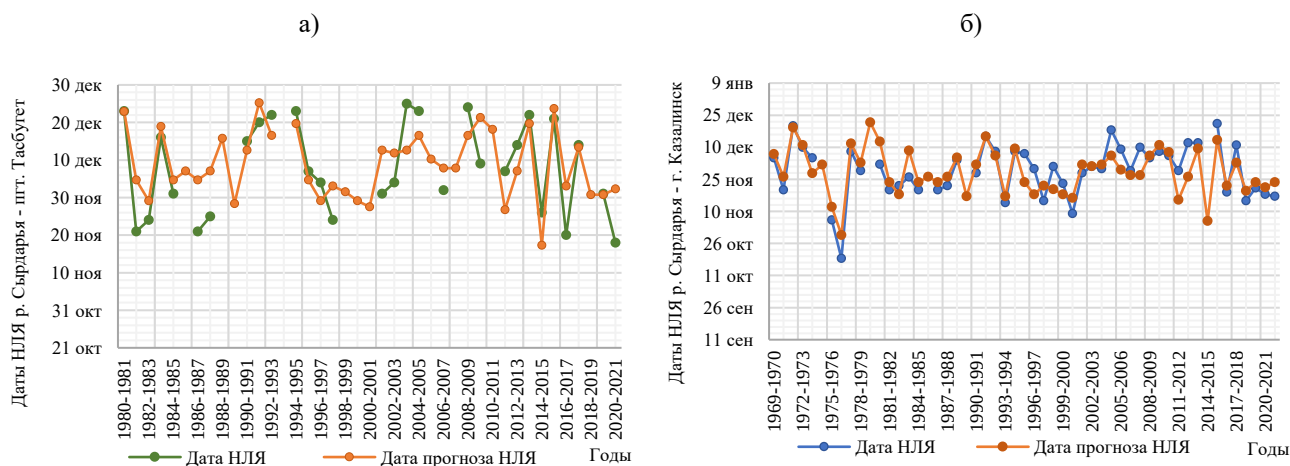


Рисунок 7. График фактических и прогнозируемых дат начала ледовых явлений по р. Сырдарья: а) пгт. Тасбугет; б) г. Казалинск

Для проверки надёжности разработанных зависимостей проведено их тестирование. В таблице 4 приведены результаты прогнозов дат начала ледовых явлений на 2024 год, рассчитанные по полученным уравнениям. Для сравнения даны фактические сроки начала ледовых явлений, что позволило оценить точность прогноза и степень совпадения расчётных и наблюдаемых значений.

Сопоставление прогнозных значений с фактическими данными за 2024 год показывает высокую точность обновленных уравнений. По р. Сырдарья – пгт. Тасбугет, при использовании уравнения с предиктором дата перехода средних температур через 0°C по МС Кызылорда, прогнозная дата начала первых ледовых

явлений - 16 декабря, полностью совпала с фактической. По гидропосту у г. Казалинск, наилучший результат показал прогноз также по данным МС Кызылорда — погрешность составила –3 дня (прогнозная дата - 7 декабря, фактическая дата - 10 декабря). Таким образом, полученные уравнения продемонстрировали свою эффективность и высокую точность в прогнозировании ледовых явлений.

Таблица 4

Прогноз и фактические даты начала ледовых явлений на 2024 г.

№	Река-пост	МС	Дата перехода через 0° сред.температура			Факт
			Уравнение	Дата перехода	Дата прогноза	
1	р.Сырдарья – пгт.Тасбугет	Казалы	$y = 0.7914x + 9457$	23.11	10.12	16.12
		Кызылорда	$y = 0.9866x + 615.8$	07.12	16.12	
2	р.Сырдарья - г.Казалинск	Казалы	$y = 0.8235x + 7993.6$	23.11	29.11	10.12
		Кызылорда	$y = 0.8661x + 6062$	07.12	07.12	

Связи для прогноза дат установления ледостава на реке от дат перехода через 0° среднесуточных температур

Прогноз дат установления ледостава осуществляется с использованием уравнения зависимости дат ледостава от дат перехода среднесуточной температуры воздуха через 0 °С в сторону понижения.

Анализ зависимости для пгт Тасбугет (рисунок 8 а) показал высокую степень согласованности расчётных и фактических значений. Регрессионная зависимость, характеризуется коэффициентом корреляции 0.74, что свидетельствует о тесной связи между рассматриваемыми параметрами. Допустимая погрешность прогноза составляет ± 13 суток, при этом обеспеченность данной точности достигает 96 %, что указывает на высокую надёжность метода. Отношение среднеквадратического отклонения к средней ошибке ($S/\delta = 0.67$) дополнительно подтверждает устойчивость полученной зависимости и возможность её практического применения для краткосрочного прогнозирования даты установления ледостава на реке. Зависимость, построенная по данным МС Кызылорда отличается высокой степенью надёжности: обеспеченность составляет 96 %, коэффициент корреляции – 0.72, допустимая погрешность прогноза ± 12 суток, а отношение среднеквадратического отклонения к средней ошибке ($S/\delta = 0.69$) подтверждает стабильность установленной связи и её применимость для практических задач гидропрогнозирования.

Анализ зависимости (рисунок 8 б) показал удовлетворительную согласованность фактических и расчётных сроков ледовых явлений по гидропосту р. Сырдарья – г. Казалинск. Построенная по данным МС Казалинск за период 1970...2021 гг. регрессионная зависимость характеризуется коэффициентом корреляции 0,77 и обеспеченностью 98 %, что свидетельствует о высокой надёжности полученной связи. Допустимая погрешность прогноза составляет ± 9 суток, а отношение среднеквадратического отклонения к средней ошибке ($S/\delta = 0.66$) указывает на устойчивость зависимости и возможность её практического применения. Для аналогичной зависимости, построенной на основе метеоданных МС Кызылорда: коэффициент корреляции составил 0.81, обеспеченность 98 %, при допустимой погрешности прогноза ± 10 суток и значении отношения среднеквадратического отклонения к средней ошибке $S/\delta = 0.57$. Совокупность полученных результатов подтверждает достаточную надёжность и устойчивость методики для использования в прогнозах.

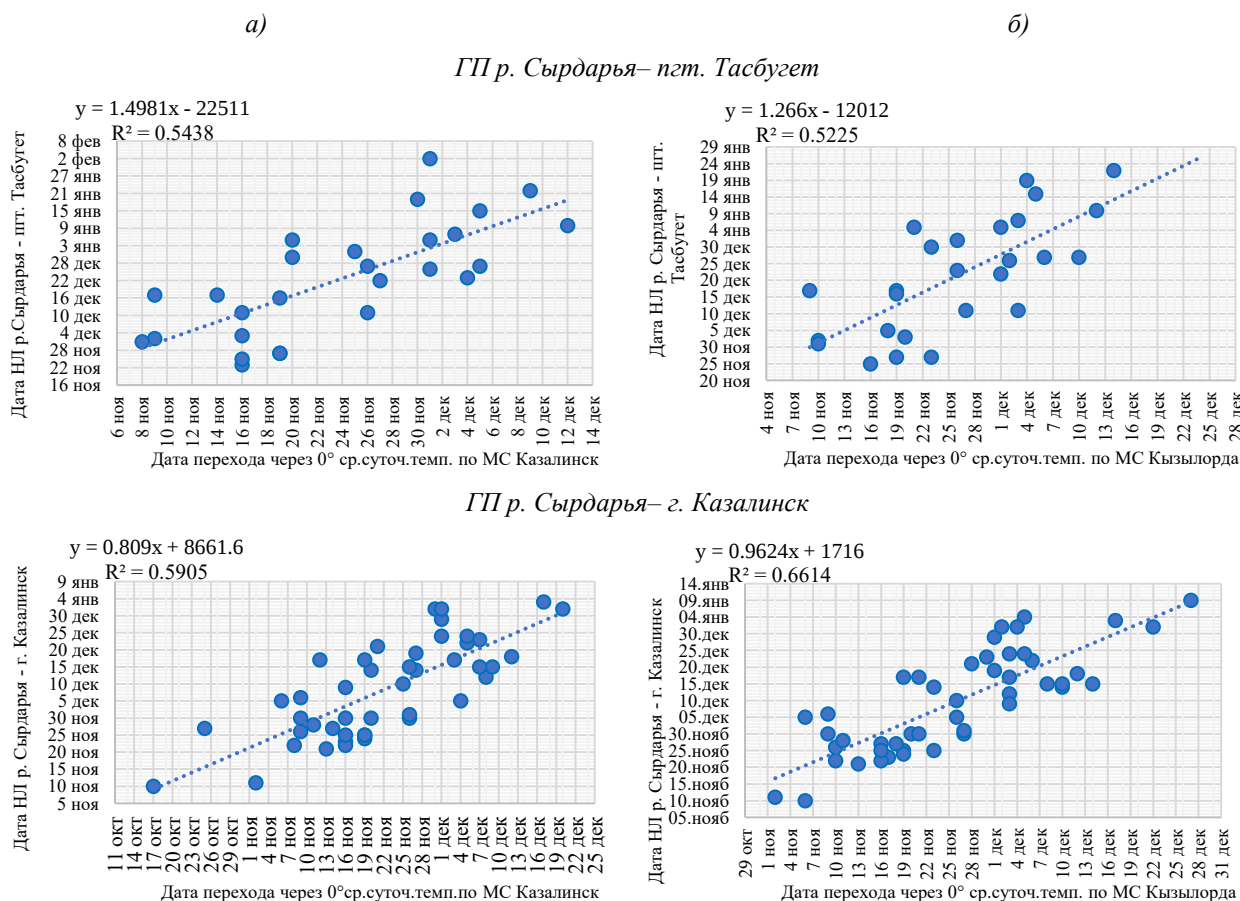


Рисунок 8. Зависимость даты установления ледостава на ГП р. Сырдарья – пгт. Тасбугет (а) и р. Сырдарья – г. Казалинск (б) от дат перехода среднесуточных температур через 0° до начала ледостава по МС Казалинск и МС Кызылорда

После определения зависимостей и получения уравнений связи, пригодных для прогнозирования сроков установления ледостава на р. Сырдарья, были выполнены расчёты и построены графики, отражающие динамику фактических и прогнозируемых дат ледостава (рисунок 9). Результаты показали хорошую сходимость и удовлетворительное воспроизведение фактических сроков установления ледостава.

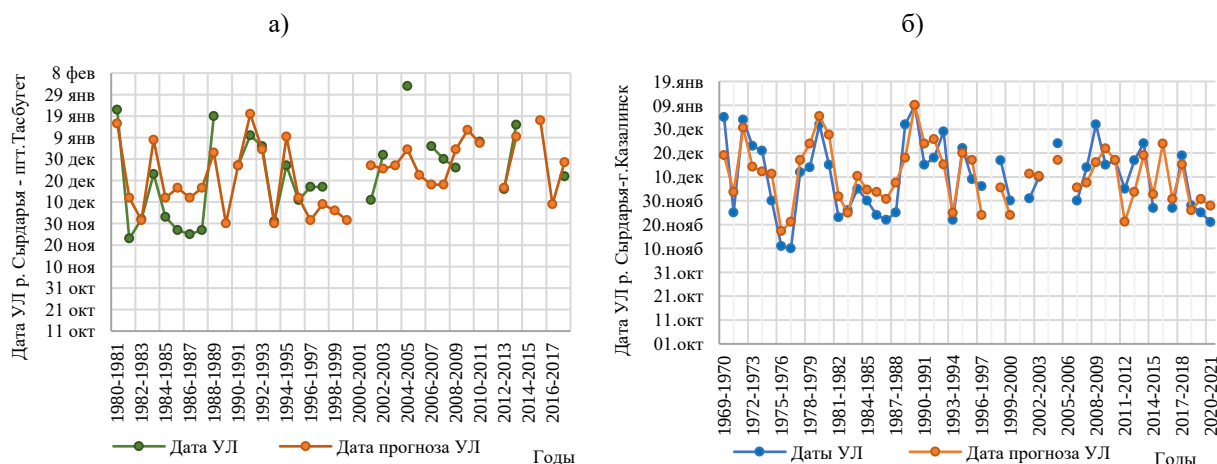


Рисунок 9. График фактических и прогнозируемых дат начала ледостава по р. Сырдарья: а) пгт. Тасбугет; б) г. Казалинск

В таблице 5 представлены результаты прогноза дат установления ледостава в 2024 году, рассчитанные по уравнениям, построенным на основе выявленных зависимостей.

Таблица 5

Прогноз и фактические даты установление ледостава на 2024 г.

№	Река-пост	МС	Дата перехода через 0 сред.температура			Факт
			уравнение	дата перехода	дата прогноза	
1	р.Сырдарья -пгт.Тасбугет	Казалы	$y = 1.4981x - 22511$	23.11	22.12	не установился
		Кызылорда	$y = 1.266x - 12012$	07.12	05.01	
2	р.Сырдарья -г.Казалинск	Казалы	$y = 0.809x + 8661.6$	23.11	11.12	не установился
		Кызылорда	$y = 0.9624x + 1716$	07.12	20.12	

Согласно данным наблюдений, в 2024 году устойчивый ледостав не сформировался, это подтверждается обзором РГП «Казгидромет» [17], характеризуя этот год одним из самых теплых за период наблюдений, в особенности теплыми выдались именно зимние месяцы, при которых формирование снежного покрова происходило с опозданием, а его сход отмечался раньше обычного срока.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работы учтены различные синоптические факторы, в том числе среднесуточные и максимальные температуры воздуха, а также даты перехода температуры через 0 °С. Построенные зависимости показали эффективность и могут использоваться как надёжный инструмент при прогнозировании сроков вскрытия, начала ледовых явлений и установления ледостава.

На основе выполненных расчётов установлено следующее:

1. Наиболее достоверные результаты при прогнозировании сроков вскрытия были получены при использовании предиктора «дата перехода максимальной температуры через 0 °С. Так, для р. Сырдарья – пгт. Тасбугет по данным МС Казалы прогнозная дата составила 25 февраля при фактической 21 февраля (погрешность – 4 дня). Для р. Сырдарья – г. Казалинск прогнозная дата составила 16 марта при фактической 18 марта (погрешность 2 дня), что подтверждает надёжность метода.

2. При прогнозировании начала первых ледовых явлений также отмечено хорошее совпадение с фактическими данными. По р. Сырдарья – пгт. Тасбугет по данным МС Кызылорда прогнозная дата совпала с фактической – 16 декабря. Для р. Сырдарья – г. Казалинск прогноз составил 7 декабря при фактической дате 10 декабря, что указывает на высокую точность прогноза.

3. По датам установления ледостава были рассчитаны прогнозные значения, однако по исследуемым пунктам устойчивый ледостав в 2024 году не сформировался вследствие климатических условий.

Проведённые исследования по прогнозированию сроков вскрытия, появления первых ледовых явлений и установления ледостава на р. Сырдарья представляют собой значимый вклад в развитие гидрологических прогнозов. Полученные результаты позволили не только уточнить зависимости для прогноза сроков ледообразования, но и расширить наблюдательный ряд ледовых характеристик по исследуемым створам.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Данные, использованные в данном исследовании, были получены авторами из РГП «Казгидромет».

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – СБС, ТАТ; управление данными – ББА, МКН; формальный анализ – ТАТ, ББА, МКН; методология – ББА, МКН; руководство – СБС, ТАТ; визуализация – ББА, МКН; написание исходной статьи – ББА, МКН; написание и редактирование статьи – ТАТ, ББА, МКН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 3. Прогноз ледовых явлений на реках и водохранилищах. – Л.: Гидрометеониздат, 1989. – С. 4–5.
- 2 Георгиевский Ю. М. Краткосрочные и долгосрочные прогнозы ледовых явлений на реках, озёрах и водохранилищах. – Л., 1986.
- 3 Аполлов Б. А., Калинин Г. П., Комаров В. Д. Курс гидрологических прогнозов. – М.: Гидрометеониздат, 1974.
- 4 Шуляковский Л. Г., Еремина В. И. К методике прогноза заторных уровней воды // Метеорология и гидрология. – 1952. – № 1. – С. 46–51.
- 5 Гинзбург Б. М., Солдатова И. И. Многолетняя изменчивость сроков ледовых явлений на реках как индикатор колебаний климата переходных сезонов // Метеорология и гидрология. – 1997. – № 11. – С. 99–106.
- 6 Солдатова И. И. Многолетние изменения сроков наступления ледовых явлений на реках СНГ: дис. ... канд. геогр. наук: 11.00.07. – М., 1996. – 131 с.
- 7 Солдатова И. И. О сроках ледовых явлений на реках в условиях современного климата // Метеорология и гидрология. – 1996. – № 4. – С. 87–94.
- 8 Савченко Е. И. Естественные функции полей дат появления льда на реках // Труды ГГИ. – 1974. – Вып. 117. – С. 74–81.
- 9 Захаров В. П. Ледовый режим низовий рек Средней Азии и вопросы его исследования // Гидрометеорология в помощь народному хозяйству. – Ташкент: Изд-во АН УзССР, 1954.
- 10 Методика прогнозирования сроков появления льда, установления ледостава на р. Сырдарья. – Алматы, 2005. – 49 с.
- 11 Методическая записка по прогнозированию первых ледовых явлений на среднем участке р. Или. – Алма-Ата, 1960.
- 12 Машуков П. М. Гидрометеорологические условия зимних наводнений на р. Сырдарье. – Л.: Гидрометеониздат, 1969.
- 13 Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. – Алматы.
- 14 Система управления базами климатических данных. [Электронный ресурс] URL: <http://10.0.2.242/cliware/index.jsp> (дата обращения: 01.09.2025 г.).
- 15 Дрейпер Н. Р., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. – М., 2007. – 912 с.
- 16 Chatterjee S., Hadi A. S. (2015). Regression Analysis by Example. – Hoboken: John Wiley & Sons.
- 17 Обзор об особенностях климата на территории Казахстана 2024. – Астана, 2025.

REFERENCES

- 1 Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam. Vyp. 3. Prognoz ledovykh yavlenii na rekakh i vodokhranilishchakh (1989). [Guidelines for hydrological forecasts. Issue 3. Forecast of ice phenomena on rivers and reservoirs]. Leningrad: Gidrometeoizdat, pp. 4–5 [in Russian]
- 2 Georgievskii Yu. M. (1986). Kratkosrochnye i dolgosrochnye prognozy ledovykh yavlenii na rekakh, ozerakh i vodokhranilishchakh [Short-term and long-term forecasts of ice phenomena on rivers, lakes and reservoirs]. Leningrad [in Russian].
- 3 Apollov B. A., Kalinin G. P., Komarov V. D. (1974). Kurs gidrologicheskikh prognozov [Course of hydrological forecasts]. Moscow: Gidrometeoizdat [in Russian].
- 4 Shulyakovskii L. G., Eremina, V. I. (1952). K metodike prognoza zatornykh urovnei vody [On the method of forecasting ice-jam water levels]. Meteorologiya i gidrologiya, no. 1, pp. 46–51 [in Russian].
- 5 Ginzburg B. M., Soldatova I. I. (1997). Mnogoletnyaya izmenchivost' srokov ledovykh yavlenii na rekakh kak indikator kolebani klimata perekhodnykh sezonov [Long-term variability of ice phenomena on rivers as an indicator of climate fluctuations in transitional seasons]. Meteorologiya i gidrologiya, no. 11, pp. 99–106 [in Russian].
- 6 Soldatova I. I. (1996). Mnogoletnie izmeneniya srokov nastupleniya ledovykh yavlenii na rekakh SNG [Long-term changes in the timing of ice phenomena on rivers of the CIS]. PhD dissertation (Geography), Moscow, 131 p. [in Russian].
- 7 Soldatova I. I. (1996). O srokakh ledovykh yavlenii na rekakh v usloviyakh sovremennogo klimata [On the timing of ice phenomena on rivers in modern climate conditions]. Meteorologiya i gidrologiya, no. 4, pp. 87–94 [in Russian].
- 8 Savchenko E. I. (1974). Estestvennye funktsii polei dat poyavleniya l'da na rekakh [Natural functions of the fields of ice appearance dates on rivers]. Trudy GGI, vol. 117, pp. 74–81 [in Russian].
- 9 Zakharov V. P. (1954). Ledovyi rezhim nizovii rek Srednei Azii i voprosy ego issledovaniya [Ice regime of the lower reaches of rivers in Central Asia and issues of its study]. In: Gidrometeorologiya v pomoshch' narodnomu khozyaistvu [Hydrometeorology in aid of the national economy]. Tashkent: AN UzSSR [in Russian].
- 10 Metodika prognozirovaniya srokov poyavleniya l'da, ustanovleniya ledostava na r. Syrdar'ya [Methodology for forecasting the timing of ice appearance and ice cover establishment on the Syrdarya River]. (2005). Almaty, 49 p. [in Russian].
- 11 Metodicheskaya zapiska po prognozirovaniyu pervykh ledovykh yavlenii na srednem uchastke r. Ili [Methodological note on forecasting the first ice phenomena on the middle section of the Ili River]. (1960). Alma-Ata [in Russian].
- 12 Mashukov P. M. (1969). Gidrometeorologicheskie usloviya zimnikh navodnenii na r. Syrdar'e [Hydrometeorological conditions of winter floods on the Syrdarya River]. Leningrad: Gidrometeoizdat [in Russian].
- 13 Gosudarstvennyi vodnyi kadastr. Ezhegodnye dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi [State water cadastre. Annual data on the regime and resources of surface waters of land]. Almaty [in Russian].
- 14 Sistema upravleniya bazami klimaticheskikh dannykh. [Electronic resources] URL: <http://10.0.2.242/cliware/index.jsp> (date access 01 September 2025).
- 15 Dreiper N. R., Smit G. (2007). Prikladnoi regressiionnyi analiz [Applied regression analysis]. Moscow, 912 p. [in Russian].
- 16 Chatterjee S., Hadi A. S. (2015). Regression Analysis by Example. Hoboken: John Wiley & Sons.
- 17 Obzor ob osobennostyakh klimata na territorii Kazakhstana 2024 [Review on the climate features of Kazakhstan, 2024]. (2025). Astana [in Russian].

КЛИМАТТЫҢ ӨЗГЕРУІ ЖАҒДАЙЫНДА СЫРДАРИЯ ӨЗЕНІНДЕГІ МҰЗДЫҚ ҚҰБЫЛЫСТАРДЫҢ МЕРЗІМДЕРІН БОЛЖАУ ӘДІСТЕМЕСІН ЖЕТІЛДІРУ

Серик Б. Саиров¹ г.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Турсын А. Тілләкәрім¹ PhD, Бота Б. Айтымова¹, Мариям Қ. Нұрхан^{1,2*}

¹ «Қазгидромет» РМҚ, Астана, Қазақстан; sairov_s@meteo.kz, tillakarim_t@meteo.kz, aitymova_b@meteo.kz, nurkhan_m@meteo.kz

² Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; nurkhan_m@meteo.kz

*Автор корреспонденция: Мариям Қ. Нұрхан, nurkhan_m@meteo.kz

ТҮЙІН СӨЗДЕР

мұз ашылу,
мұз қату,
статистикалық әдіс,
ауа температурасының
тәуліктік орташа мәні,
Қазақстан

Мақала жайында:

Жіберілді: 06.10.2025

Қайта қаралды: 06.10.2025

Қабылданды: 06.10.2025

Жарияланды: 08.10.2025

АБСТРАКТ

Жұмыста Қазақстан аумағындағы Сырдария өзенінде мұздың ашылу мерзімдерін, алғашқы мұз құбылыстарының пайда болуын және мұз қатуының қалыптасуын болжау әдістемелерін жаңарту нәтижелері, регрессиялық талдау әдісімен алынған және олардың апробациясы ұсынылған. Ең үлкен практикалық маңызға мұздың пайда болу және бұзылу мерзімдерін болжау, яғни, олар тұтынушылардың кең ауқымы арасында сұранысқа ие. Сондай-ақ Сырдария өзенінде мұз жамылғысының қалыптасу және бұзылу мерзімдерін болжау Шардара су қоймасынан су жіберулерді жедел реттеуге және осылайша аймақтың су ресурстарын ұтымды басқаруға мүмкіндік береді. Мұндай болжамдар су қоймасынан төмен орналасқан Тасбугет кенті мен Қазалы қаласы маңындағы гидрологиялық посттар үшін ерекше өзектілікке ие. Сырдария өзенінің гидрометеорологиялық деректерін талдау негізінде мұздың ашылу және алғашқы мұз құбылыстарының басталу мерзімдерін болжау орындалды. «Ең жоғары температураның 0 °C арқылы өту күні» предикторын пайдалану болжамдардың жоғары дәлдігін (қателік 2...4 күн) қамтамасыз ететіні анықталды, ал алғашқы мұз құбылыстары үшін іс жүзіндегі деректермен дерлік толық сәйкес келуі байқалды және қажетті алдын ала мерзімділікке (8...12 күн) қол жеткізуге мүмкіндік береді, бұл олардың гидроболжау қызметі үшін практикалық маңыздылығын арттырады.

IMPROVEMENT OF METHODS FORECASTING THE TIMING FOR OF ICE PHENOMENA ON THE SYRDARYA RIVER UNDER CLIMATE CHANGE CONDITIONS

Serik Sairov¹ Candidate of Geographical Sciences, associate professor, Tursyn Tillakarim¹ PhD, Bota Aitymova¹, Mariyam Nurkhan^{1,2*}

¹ RSE «Kazhydromet», Astana, Kazakhstan; sairov_s@meteo.kz, tillakarim_t@meteo.kz, aitymova_b@meteo.kz, nurkhan_m@meteo.kz

² L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; nurkhan_m@meteo.kz

*Corresponding author: Mariyam Nurkhan, nurkhan_m@meteo.kz

KEY WORDS

ice break-up,
freeze-up,
statistical method,
mean daily air temperature,
Kazakhstan

ABSTRACT

The paper presents the results of updating the methods for forecasting the dates of ice break-up, the occurrence of the first ice phenomena, and the establishment of ice cover on the Syrdarya River within Kazakhstan, obtained by the method of regression analysis and their testing. The greatest practical importance is represented by forecasts of the dates of ice formation and break-up, which are in demand among a wide range of consumers. Also, forecasting the dates of establishment and break-up of ice cover on the Syrdarya River makes it possible to promptly regulate releases from the Shardara Reservoir and thereby rationally manage the water resources of the region. Such forecasts are of particular relevance for the sections near the settlement of Tasbuket and the town of Kazalinsk, located downstream of the reservoir. Based on the analysis of hydrometeorological data of the Syrdarya River, forecasting of the

About article:

Received: 06.10.2025

Revised: 06.10.2025

Accepted: 06.10.2025

Published: 08.10.2025

dates of ice break-up and the beginning of ice phenomena was carried out. It was established that the use of the predictor “date of maximum temperature transition through 0 °C ensures high accuracy of forecasts (an error of 2...4 days), and for the first ice phenomena almost complete coincidence with actual data was noted, allowing the achievement of the required lead time (8...12 days), which increases their practical significance for the hydrological forecasting service.

Примечание издателя: заявления, мнения и данные во всех публикациях принадлежат только автору (авторам), а не журналу "Гидрометеорология и экология" и/или редактору (редакторам).