МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра инженерной гидрологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

На тему **Прогнозирование ледовых явлений на реке Хатанга**

Исполнитель Терник Кристина Данииловна

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель к.т.н., доцент

(ученая степень, ученое звание)

Девятов Владимир Сергеевич

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

к.т.н., доцент

(ученая степень, ученое звание)

Гайдукова Екатерина Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«01» июня 2026 г.

Санкт–Петербург

2026

Содержание

Введение ... 3

1 Физико-географическое описание района ... 7

1.1 Гидрология ... 8

1.2 Ледовая обстановка и ледовый режим ... 9

1.3 Климат ... 9

1.4 Гидрографическая характеристика ... 9

1.5 Морской торговый порт Хатанга ... 10

1.6 Антропогенное воздействие ... 12

2 Методы прогноза ледовых явлений на реках Арктической зоны Российской Федерации ... 14

2.1 Краткосрочные прогностические методы ... 14

2.2 Долгосрочные прогностические методы ... 18

3 Анализ гидрометеорологических условий и обзор исходных данных реки Хатанга ... 20

3.1 Формирование базы гидрометеорологических данных ... 20

3.2 Оценка современных гидрометеорологических условий на реке Хатанга ... 22

3.3 Определение расчетного судоходного уровня (РСУ) ... 26

4 Разработка методики прогноза ледовых явлений на реке Хатанга ... 29

4.1 Прогнозирование ледовых явлений методом регрессии ... 32

4.2 Описание методологических основ разрабатываемой методики, основанной на дереве решений ... 42

4.3 Алгоритм прогноза ... 42

4.4 Апробация метода прогноза..... 47

Заключение 50

Список литературы 53

Введение

Актуальность данного исследования обусловлена растущей значимостью арктических водных путей для транспортной инфраструктуры Российской Федерации и ускорением изменений климатических условий в Арктике. Река Хатанга, расположенная в северной части Красноярского края, является одним из наиболее значимых гидрологических объектов Арктической зоны РФ. Она входит в бассейн моря Лаптевых и формируется в результате соединения рек Котуй и Хета (рисунок 1).



Рисунок 1 – Слияние рек Хатанга, Котуй и Хета.

Ее ледовый режим оказывает прямое влияние на безопасность судоходства, работу морского порта, функционирование ледовых переправ и жизнеобеспечение удаленных поселений. В условиях ускоренного потепления

климата, который характерен для арктических территорий, наблюдается значительное изменение ледового режима рек: сокращение продолжительности ледостава за счет увеличения межгодовой изменчивости дат вскрытия и замерзания рек.

Торговый порт Хатанга расположен на правом берегу реки Хатанга. Регулярное речное судоходство было открыто в 1936 году, а в 1954 году порт стал морским [17]. Сейчас это единственное предприятие, собственный флот которого может осуществлять сквозные перевозки по всей трассе Северного морского пути с последующей доставкой грузов в акватории с малыми глубинами, на необорудованный берег и реки арктического побережья РФ (рисунок 2).



Рисунок 2 – Северный морской путь.

Для реки Хатанга наибольшую прогностическую пригодность представляют краткосрочные методы, учитывающие термодинамические и гидродинамические особенности ледового режима, из-за ее расположения в

условиях арктического климата и характеризующейся коротким навигационным периодом. Для прогнозирования осенних ледовых явлений (появление льда и установления ледостава) целесообразно применение эмпирических зависимостей, которые основаны на суммах отрицательных температур воздуха. Прогноз толщины льда лучше осуществлять с использованием физико-статистических моделей нарастания льда (формулы Пиотровича), учитывающих наличие и высоту снежного покрова. Наиболее сложным этапом является весеннее вскрытие: из-за течения реки с юга на север и преимущественно снегового типа питания доминирующим фактором выступает гидродинамический механизм: взлом ледяного покрова под действием резкого поднятия уровня воды в следствии половодья, формирующегося в южных районах бассейна. Поэтому прогноз даты вскрытия должен быть основан на комбинированном подходе, интегрирующем оценку прочности ледяного покрова (термический фактор) и расчет подъема уровня воды (механический фактор) [2].

Для долгосрочной оценки изменчивости ледового режима в условиях климатических трендов предлагается использовать статистический метод, основанный на регрессионном и корреляционном анализе связей между датами ледовых явлений и предикторами, что позволяет количественно оценить трансформацию ледового режима под влиянием потепления.

В последнее время в гидрологических исследованиях все чаще применяются методы машинного обучения, среди которых особое место занимает дерево решений, алгоритм, сочетающий высокую прогностическую способность с возможностью наглядной интерпретации. Он, в отличии от эмпирических зависимостей, автоматически выявляет нелинейные связи и пороговые значения предикторов, что особенно важно в условиях нестационарного климата.

Данный подход позволяет учитывать более сложное взаимодействие термодинамических и гидродинамических факторов для ледового режима реки Хатанга.

В связи с вышеизложенным целью исследования является оценить влияние современных климатических трендов на ледовый режим реки Хатанга и предложить оптимальную методику прогноза ледовых явлений, устойчивую к изменяющимся условиям.

Для достижения цели исследования необходимо решить следующие задачи:

а) проанализировать физико-географические и гидрометеорологические особенности бассейна реки Хатанга с целью выявления климатических трендов, влияющих на ледовый режим;

б) оценить эффективность традиционных эмпирических методик прогноза ледовых явлений в условиях современного изменяющегося климата;

в) сформировать базу гидрометеорологических данных за многолетний период;

г) разработать и апробировать методику прогноза ледовых явлений с использованием современных подходов (деревья решений / регрессионные модели);

д) сформулировать практические рекомендации по использованию разработанной методики.

Физико-географическое описание района

Хатанга – река в Азиатской части России, на севере Восточной Сибири, в Красноярском крае. Относится к бассейну моря Лаптевых.



Рисунок 3 – Хатангский залив.

Образуется при слиянии рек Котуй и Хета и впадает в Хатангский залив (рисунок 3) моря Лаптевых. Хатанга протекает в широкой долине по Северо-Сибирской низменности, ширина долины до 5 км, а в русле расположено большое количество островов. При впадении в Хатангский залив образует эстуарий. Длина от верхней части эстуария вместе с самой рекой Хатанга 210 км. Длина Котуя 1409 км, Хеты – 604 км. Площадь бассейна 364 тыс. км^2 [14].

Основные притоки: Котуй, Попигай, Хета, Новая (рисунок 4).



Рисунок 4 – Бассейн реки Хатанга [12].

1.1 Гидрология

Питание реки преимущественно снеговое. Половодье начинается в конце мая и продолжается приблизительно до августа. Замерзание реки происходит в конце сентября – начале октября, вскрытие же начинается в конце мая – первой половине июня. Среднегодовой расход воды на реке Хатанга у села Хатанга составляет 2370 м^3/с. В устье среднегодовой расход составляет 3320 м^3/с [14].

Размах колебаний уровня воды составляет 6–10 метров в год. На режим колебания уровней в низовьях реки Хатанга, на равнинном участке Котуя и на реке Хета наблюдаются сгоны и нагоны, достигающие 2 м, и приливы.

1.2 Ледовая обстановка и ледовый режим

Ледовый режим реки Хатанга характеризуется продолжительным периодом ледостава, который в среднем составляет 235 дней. Высокая толщина ледяного покрова обусловлена небольшой мощностью снежного покрова и низкими отрицательными температурами, что способствует интенсивному нарастанию льда. Ледовые явления имеют строго выраженную сезонную цикличность: осенью формируется сплошной ледостав, зимой наблюдается стабильный ледяной покров, весной происходит подвижка льда на фоне начинающегося половодья, ледоход и вскрытие [19].

Так как Хатанга течет с юга на север, то при снеговом питании половодье формируется в южных бассейнах задолго до начала таяния льда в низовьях, что говорит о вероятном заторообразовании.

1.3 Климат

Климат в бассейне резко континентальный. Верховья реки находятся в области действия Сибирского антициклона. За три месяца: июнь, июль и август проходят три сезона: весна, лето и осень. Среднегодовая температура составляет примерно –12,4 °С. Температура воздуха в январе –32–(–34) °С, в июле около 12–13 °С. Полярная ночь длится 45 суток, полярный день – 68 суток. В среднем запас воды в снежном покрове составляет 120 мм [16].

1.4 Гидрографическая характеристика

Верхняя и средняя части бассейна реки Хатанга расположены в пределах Среднесибирского плоскогорья, нижняя располагается на Северо-Сибирской низменности. Наиболее возвышенная часть находится на плато Путорана

(высота до 1500 м), оно обрывается и переходит в Северо-Сибирскую низменность. Нижняя часть бассейна реки Хатанга – это равнина, которая характеризуется невысокими холмами и множеством мелких ледниковых и термокарстовых озер. Речная сеть представляет собой мелкие реки, соединяющие озера или берущие из них начало. Густота речной сети 0,45 км/км^2. Озерность – 3,2%. Заболоченность в нижней части водосбора превышает 10 %. Самое большое озеро по площади зеркала – Ессей (238 км^2) [14].

1.5 Морской торговый порт Хатанга

Река судоходна до узла слияния и выше. Навигация длится около 3 месяцев, с середины июня по сентябрь. Морской порт расположен на правом берегу реки Хатанга (рисунок 5). Регулярное судоходство было открыто в 1936 году, когда пароход «Игарец» с груженой баржей прошел бухты Кожевникова по Хатангскому заливу и реке до села Хатанга.



Рисунок 5 – Расположение порта Хатанга

Порт стал морским 25 декабря 1954 года, когда приказом министра морского флота №154 на базе Хатангской речной конторы и Нордвикского морского порта был образован Хатангский арктический морской порт [17].

В дальнейшем численность флота продолжала расти и ко второй половине 20 века число самоходных судов увеличилось в пять раз, а грузооборот порта вырос в 13 раз. Поэтому, если в 1974 году порт обрабатывал 159 тысяч тонн грузов, то к 1984 году уже 312 тысяч тонн грузов.

В конце 1990-х годов порт переживал кризис. Объемы производства падали, флот, имеющийся на тот момент оказался не востребован, начинал стареть и приходить в негодность. Из-за этого часть судов была списана и выведена для передачи в другие регионы страны транспортными организациями.

В 2006 году начался новый этап в развитии порта, была основана компания «Хатангский морской торговый порт» (рисунок 6). Сейчас это единственное предприятие, собственный флот которого может осуществлять перевозки по всей трассе Северного морского пути и последующую доставку грузов в акватории с малыми глубинами, на реки арктического побережья РФ и на необорудованный берег.



Рисунок 6 – Хатангский морской торговый порт.

1.6 Антропогенное воздействие

Антропогенное воздействие значительно уступает влиянию естественных факторов. В бассейне расположены запасы природного газа, нефти и каменного угля, но геологоразведочные работы ограничены из-за труднодоступности региона и суровых климатических условий. Действует промышленный рыбный промысел. В верхней части бассейна с 1988 года функционирует Путоранский государственный природный заповедник, который дополнительно ограничивает хозяйственную деятельность и способствует сохранению экосистем. Также на территории реки Хатанга отсутствуют крупные гидротехнические сооружения (ГЭС, водохранилища и промышленные комплексы), способные воздействовать на трансформацию стока или термический режим.

Однако, если рассматривать статью П. А. Никитиной и Н. А. Бродской «Техногенное воздействие на природные воды бассейна реки Хатанга» [9], то согласно данным мониторинга Енисейского бассейного округа, основными загрязняющими веществами являются лигнин гидролизный и нефтепродукты. В период с 2008 по 2015 гг. доля проб с превышением ПДК по лигнину гидролизному достигала 71–98 %, а по нефтепродуктам – 40–42 %.

Особую обеспокоенность вызывает факт крупного разлива углеводородов: 27 сентября 2020 года в устьевой части реки Хатанга произошел разлив около одной тонны нефти при перекачке из танкера во время шторма (рисунок 7).



Рисунок 7 – Разлив одной тонны нефти в р. Хатанга 27.09.2020 (фото взято из статьи П. А. Никитиной и Н. А. Бродской «Техногенное воздействие на природные воды бассейна реки Хатанга»).

Данный инцидент подчеркивает уязвимость экосистемы реки к аварийным ситуациям, особенно в условиях короткого навигационного периода и сложной логистики реагирования в Арктике. При этом, как отмечают авторы, систематический гидрохимический мониторинг в бассейне отсутствует, а существующие данные больше исключение, что затрудняет объективную оценку состояния водных ресурсов и разработку эффективных мер по их охране.

Методы прогноза ледовых явлений на реках Арктической зоны Российской Федерации

Методы прогноза ледовых явлений на реках АЗРФ включают прогнозы появления льда, установление ледостава, толщины ледяного покрова и вскрытия рек.

2.1 Краткосрочные прогностические методы

Для арктических условий применяются эмпирические зависимости, которые связывают даты ледовых явлений с суммами отрицательных или положительных температур воздуха. Также применяются теоретические методы, основанные на уравнении теплового баланса водной поверхности, учитывающие ветер, скорость течения, радиационные факторы и теплообмен с атмосферой. Вскрытие рек прогнозируется с учетом теплового и механического факторов (таких как сумма положительных температур и подъем уровня воды соответственно).

Обзор методов краткосрочного прогноза ледовых явлений.

Эмпирические зависимости

Прогноз, основанный на связи даты ледового явления (дата появления льда, установления ледостава, вскрытия) и накопленной суммы положительных или отрицательных температур воздуха. Для осенних явлений используется сумма отрицательных среднесуточных температур воздуха:

$$\sum t^{-} = \sum_{i=1}^{n} |t_i| \, , t_i < 0,$$

где t_i – среднесуточная температура воздуха в i-й день периода от фиксированной даты до даты ледового явления, для весенних явлений применяется сумма положительных температур.

По многолетним данным строится график зависимости даты ледового явления от соответствующей суммы температур и через облако точек строится огибающая кривая, Обеспечивающая надежность прогноза в рамках принципа «в худшем случае» [5].

Применяется при наличии многолетних рядов наблюдений, для рек с устойчивым режимом теплообмена и когда требуется быстрый и простой прогноз.

Плюсы данного метода: простота, хорошо работает при наличии длинного ряда наблюдений и устойчивом климатическом режиме, не требует большого количества метеоданных. Из минусов: отражают статистическую связь, а не причинно-следственную, теряют надежность при изменении климата, зависят от качества исходных данных.

Физико-статистические модели (формулы Пиотровича)

Суть метода в расчете толщины льда на основе уравнения теплопроводности с учетом снежного покрова. В условиях установившегося режима теплового потока толщина льда h (см) определяется по формуле:

$$h = K\sqrt{\sum|t_i| \cdot T},$$

где K – коэффициента нарастания льда, зависящий от морфометрии русла, скорости течения и наличия снега;

$\sum|t_i|$ – Сумма модулей отрицательных среднесуточных температур воздуха за период T (сут);

T – продолжительность периода непрерывного нарастания льда от даты его появления до расчетной даты.

В арктических условиях коэффициент *K* корректируется в зависимости от высоты снега по эмпирической зависимости. Чем меньше мощность снежного покрова, тем выше коэффициент *K* и, как следствие, более интенсивное нарастание льда, до 1,5–2 м за сезон.

Применяется в зимний период для оценки прочности льда под ледовыми переправами и при наличии данных о температуре воздуха и о высоте снежного покрова. При наличии снега применяется дифференциальное уравнение с учетом эквивалентной толщины льда, при отсутствии используется упрощенная формула. Метод дает прогноз с заблаговременность до 5 суток.

Плюсы метода: основан на уравнении теплопроводности и учитывает термодинамические процессы, учитывает снежный покров, можно использовать при переменных метеоусловиях. Минусы: требует большое количество исходных данных, более сложные расчеты, такие как решение дифференциального уравнения или использования интегральной формы и аккуратной обработки данных.

Гидродинамический (механический) подход (метод Булатова–Шуляковского)

Метод прогноза весеннего вскрытия рек, основанный на оценки прочности ледяного покрова и его разрушения под действием гидродинамических сил. Подходит для рек со снеговым питанием, в связи с чем обычно происходит резкий подъем уровня и механическое воздействие на ледяной покров [2].

Условие начала разрушения ледяного покрова формулируется как неравенство:

$$\sigma_h \leq f\left(\Delta H, H\right),$$

где $\sigma_h = \sigma * h$ – прочность ледяного покрова, определяемая как произведение удельной прочности льда на его толщину;

$\Delta H = H - H_{зим}$ – величина подъема уровня воды относительно зимнего минимума;

H – текущий уровень воды;

$f(\Delta H, H)$ – функция, описывающая гидродинамическое усилие потока, зависящее от скорости течения, ширины русла и уклона водной поверхности [2].

Плюсы: эффективен на реках с южным течением, где вскрытие происходит раньше половодья, учитывает механизм вскрытия и эффективен для затороопасных рек, где лед разрушается от напора воды. Минусы: нужны данные о расходах или уровнях воды, сложность оценки прочности льда.

Деревья решений

Суть метода заключается в решении задач классификации и регрессии путем разбиения исходного множества наблюдений на подмножества по значениям предикторов и автоматическом выявлении связей между предикторами и событием. Каждый узел дерева соответствует проверке условия с пороговым значением, которое оптимизируется по критерию чистоты узла (коэффициент Джини для задач классификации). Листья дерева содержат окончательный прогноз: категорию да/нет или числовое значение. Данный метод имеет высокую адаптивность к изменяющимся условиям, высокую точность при достаточном объеме данных, может учитывать множество факторов и бинарного прогноза. Однако требует качественной подготовки данных и не учитывает физическую сущность процесса.

Промежуточные выводы

Из представленных методов краткосрочного прогноза ледовых явлений для реки Хатанга наиболее эффективным является гидродинамический подход, он дает оценку разрушения ледяного покрова под напором половодья, то есть основным фактором выступает именно воздействие подъема уровня воды и расхода, а не термическое таяние. Это обусловлено тем, что Хатанга течет с юга на север, имеет снеговое питание, и весеннее половодье формируется в южных районах задолго до начала таяния льда в низовьях, что делает ее затороопасной.

Эмпирические зависимости могут использоваться как вспомогательные, но не как основные из-за выраженного влияния гидродинамического фактора и ускоренного потепления климата, из-за чего статистические связи между суммами температур и датами ледовых явлений теряют устойчивость.

В то же время деревья решений представляют интерес как современный адаптивный инструмент. Они позволяют автоматически определять пороговые значения предикторов и строить бинарные прогнозы (будет ли вскрытие раньше определенного числа), устойчивы к климатическим трендам.

2.2 Долгосрочные прогностические методы

Долгосрочные прогнозы ледовых явлений в основном строятся на статистических и аналоговых подходах, поскольку физическое моделирование процессов на время от месяца остается неточным и неопределенным. Один из методов – метод аналогии, предложенный А.П. Будыркиной [3] для реки Хатанга. Суть заключается в отборе «аналогичных» лет по совокупности метеорологических предикторов и переносе даты ледового явления из этих лет на прогнозируемый период. Но в условиях быстроизменяющегося климатического тренда надежность метода снижается. Поэтому в современных условиях лучше ограничивать выбор аналогов последними 15–20 годами.

Эмпирико-статистический метод также используется для долгосрочного прогнозирования ледовых явлений и основан на построении регрессионных или корреляционных зависимостях между датой ледового явления и набором предикторов. Для рек с основным питанием снеговым подходящим направлением является гидрологическое моделирование весеннего стока на основе оценки снегозапасов в бассейне. Этот подход реализует идею гидродинамического механизма вскрытия, но еще до начала таяния. Его применения для реки Хатанга ограничено недостаточной изученностью, малым

количеством данных в арктической зоне и сложностью учета влияния многолетней мерзлоты на формирование стока.

Как вывод, ни один из методов прогноза ледовых явлений не обеспечивает высокой надежности в условиях быстроизменяющегося климата. Для более обоснованного результата необходимо комбинировать методы между собой учитывая метод аналогии.

3 Анализ гидрометеорологических условий и обзор исходных данных реки Хатанга

В данной главе проводится комплексный анализ гидрометеорологических условий и формируется база исходных данных, которая необходима для разработки методики прогноза ледовых явлений на реке Хатанга. Отдельное внимание уделяется расчету 2 %-го и 99 %-го расчетного судоходного уровня (РСУ). Полученные результаты создают обоснованную эмпирическую и физическую основу для последующего выбора и адаптации алгоритма прогноза.

3.1 Формирование базы гидрометеорологических данных

Источники информации:

– ежедневные уровни воды на реке Хатанга 2008–2024 года – АИСГМВО [1];

– среднедекадные значения толщины льда на гидропосте Хатанга за 1947–2023 гг. – Госфонд ААНИИ (альбом Маслаевой, ГЕ, ЕДМ), отсутствие данных с 1996 по 2004 гг. в связи с консервацией гидропоста из-за отсутствия наблюдателей;

– температура воды на реке Хатанга 1935–2023 гг. – Госфонд ААНИИ (Коровкин И.П. Материалы по гидрологии р. Хатанга, экспедиция ГП ГУСМП, Фонды ОГУР, ГЕ, ЕДМ), отсутствие данных с 1996 по 2004 гг. в связи с консервацией гидропоста из-за отсутствия наблюдателей;

– среднемесячная температура воздуха на метеопосте Хатанга за 1933–2024 гг. – Метео.ру [15];

– среднесуточная температура воздуха на метеопосте Хатанга 2007–2024 гг. – Метео.ру [15];

– месячная сумма осадков на метеопосте Хатанга 1966–2024 гг. – Метео.ру [15].

Был выбран именно пост Хатанга, так как это единственный пост с регулярными наблюдениями. На нем фиксируется уровень воды, ледовые явления, соленость и др., рядом также имеется метеостанция Хатанга и порт, что делает исследование ценным для практического прогноза. Створ расположен в устьевой части, где сильнее всего проявляется затороопасность.

Используемая база гидрометеорологических данных по реке Хатанга имеет ряд существенных ограничений, которые необходимо учитывать при разработке прогностической методики.

Во-первых, на посту наблюдений отсутствуют расходы воды. Это обстоятельство исключает возможность прямого использования гидродинамических моделей, требующих данных о расходах.

Во-вторых, в отдельные годы зафиксированы пропуски в данных. Например, в 2013 и 2022 гг. отсутствуют сведения об уровнях воды. Причины этих пропусков в открытых источниках не указаны. Для обеспечения целостности выборки такие годы были исключены.

В-третьих, данных о снежном покрове практически нет. Хотя мощность снега на льду является важным фактором, замедляющим нарастание ледяного покрова осенью и таяние весной.

Таким образом, формируемая база данных, несмотря на свою ценность, характеризуется пропусками по разным параметрам. Это обусловливает необходимость применения методов, устойчивых к пропускам и способных работать с неполным набором предикторов.

3.2 Оценка современных гидрометеорологических условий на реке Хатанга

Для формирования базы гидрометеорологических данных был проведен предварительный анализ многолетнего ряда среднегодовых температур воздуха по метеостанции Хатанга за период 1960–2024 гг. с использованием метода интегральной кривой (накопленных отклонений от нормы) [8] выделено три периода:

–1987 гг.;

–2009 гг.;

–2024 гг.

Так как основная цель исследования – это разработка прогноза для современного периода, то были выбраны 2008–2024 года. В том числе из-за того, что данные текущего и предыдущего столетия репрезентативны, поэтому повышают практическую ценность разрабатываемой методики.

Выбор 2008 года в качестве начальной точки обусловлен также наличием сплошных и достоверных данных по ледовому режиму и гидрологическому режиму.

На рисунке 8 представлен хронологический график многолетнего изменения температуры воздуха за период с 1947 по 2024 гг. На нем видно устойчивую тенденции к потеплению и несмотря на значительную межгодовую изменчивость, общий восходящий тренд является статистически значимым. Из уравнения тренда можно понять, что температура воздуха в среднем увеличивается на 0,0416°C в год. Особенно интенсивный рост температур начинается с 2008 года, когда среднегодовые значения стали стабильно превышать многолетнюю норму. Такое потепление влияет на гидрологический режим реки, более раннее вскрытие и позднее замерзание, а, следовательно, и более продолжительный период свободного русла, что в свою очередь важно для морского торгового порта Хатанга.

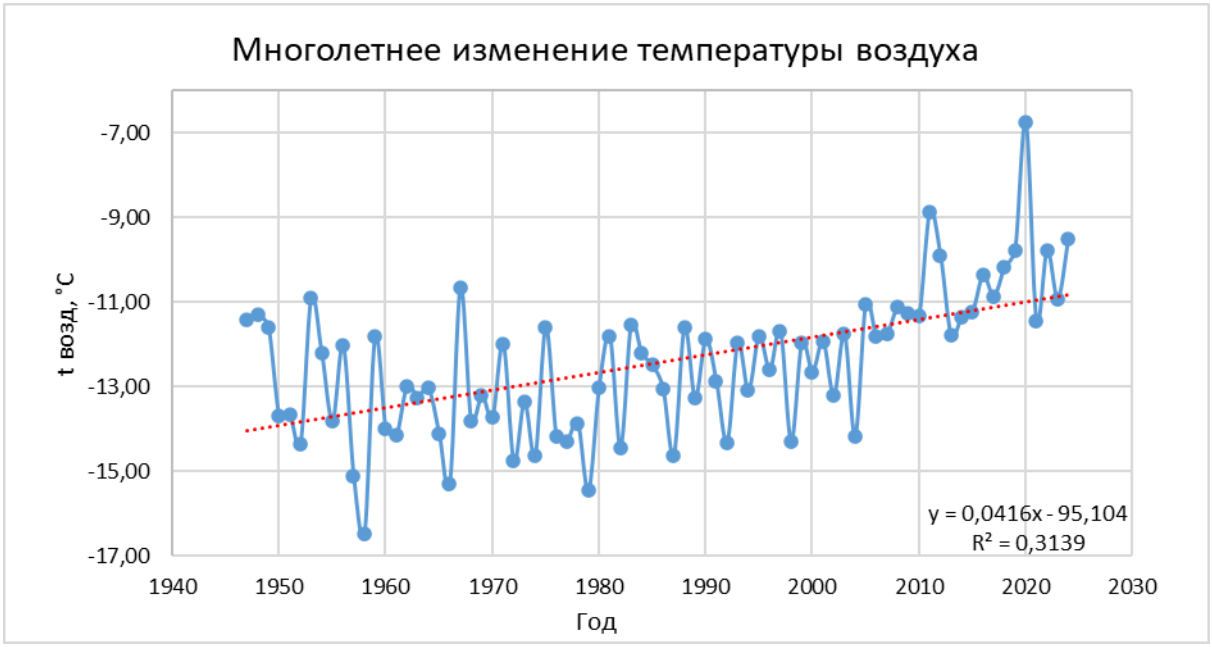


Рисунок 8 – Хронологический график многолетнего изменения температуры.

График динамики среднемесячной температуры (рисунок 9) демонстрирует сезонный разброс температур. В зимние месяцы температура опускается до –30–(–40) °C, в летние достигает 10–15°C. Осеннее похолодание начинается в сентябре, весеннее потепление начинается в апреле–мае. Наибольшая дисперсия температуры воздуха наблюдается в следующие месяцы: ноябрь, декабрь, январь, февраль, март.

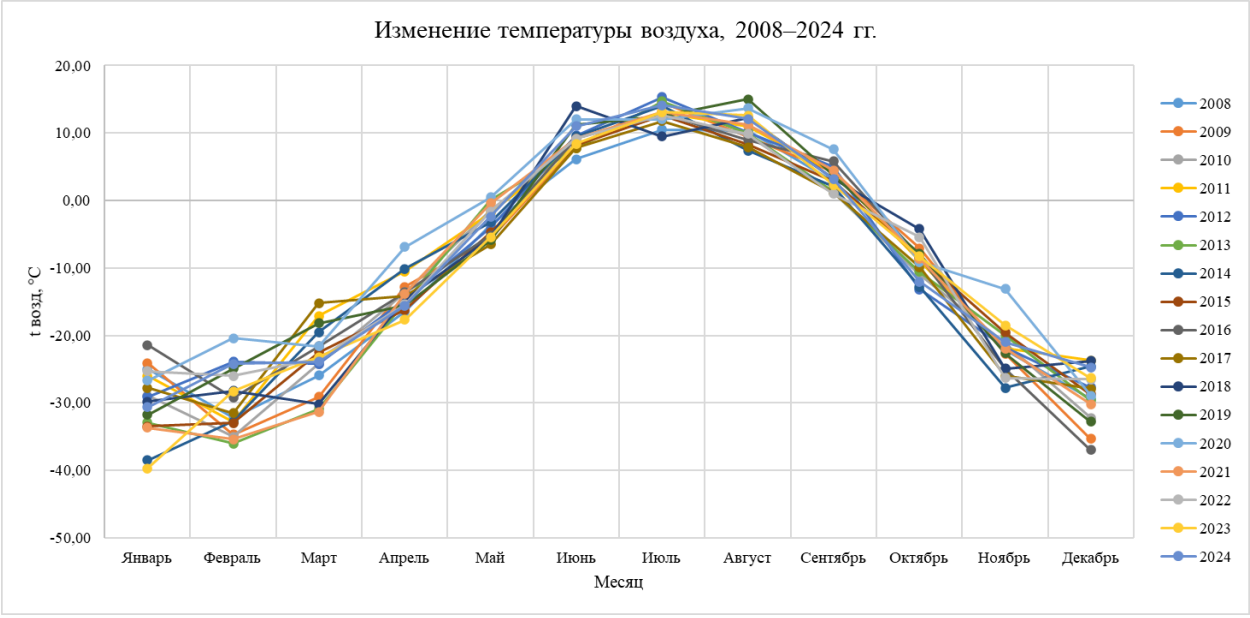


Рисунок 9 – Динамика среднемесячной температуры воздуха за 2008–2024 гг.

На рисунке 10 представлено распределение среднемесячных сумм осадков за период с 2008 по 2024 год. Анализ графика выявляет четкую сезонную структуру увлажнения, характерную для континентального климата Арктики. Максимальное количество осадков приходится на летние месяцы (июнь–август), что связано с преобладанием дождей в теплый период года. В зимний сезон (декабрь–февраль) наблюдается относительный минимум увлажнения. При этом фиксируется значительная межгодовая изменчивость: например, аномально высокие значения в конце осени 2015 года или, наоборот, дефицит осадков в отдельные зимние периоды. При этом наблюдается тенденция к увеличению осадков с 2008 до 2015 года и далее примерно равное количество осадков до 2024 года. Наибольшее количество осадков наблюдается в 2014 и 2015 годах.

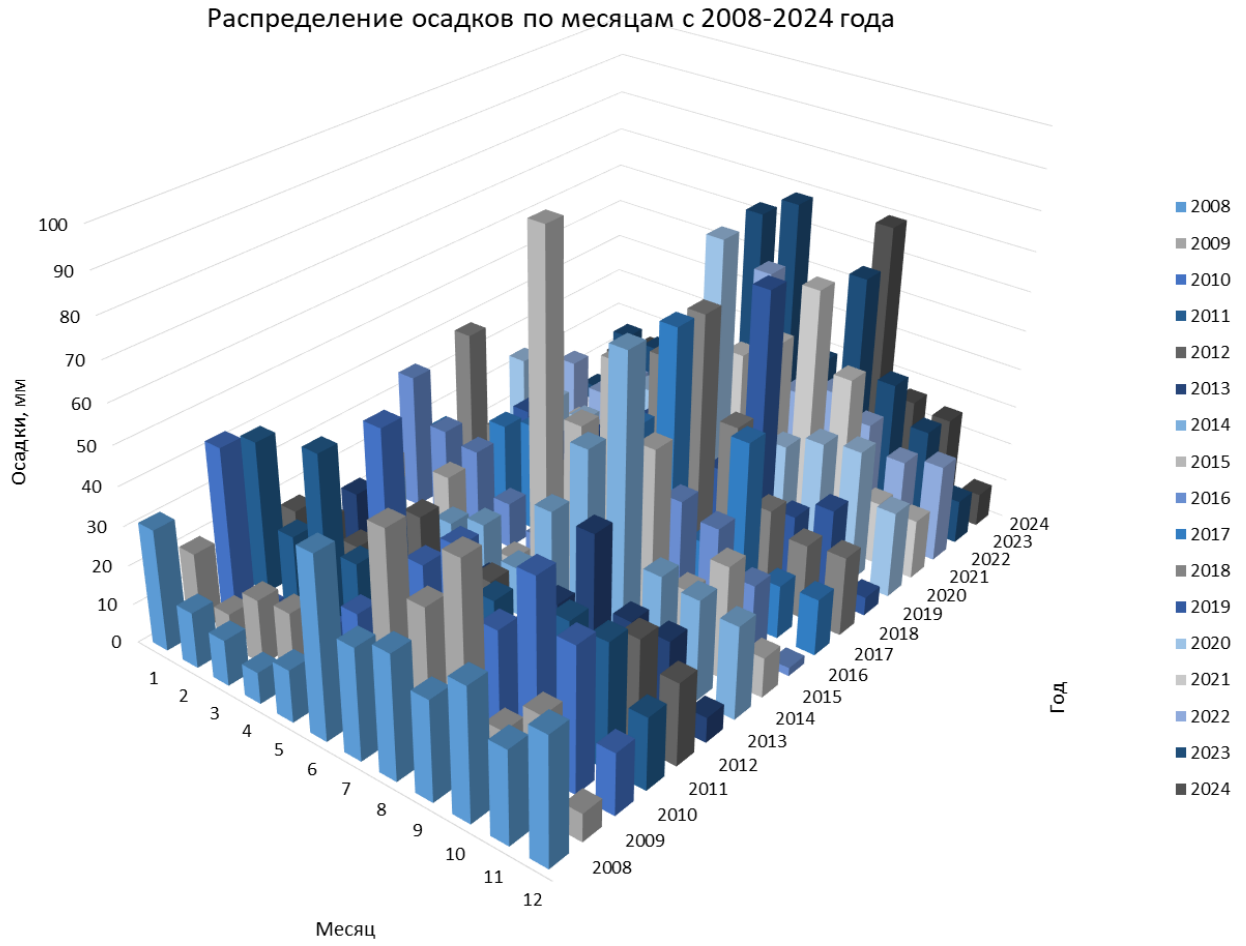


Рисунок 10 – Многолетнее внутригодовое распределение количества осадков в п. Хатанга за период 2008–2024 гг.

На рисунке 11 представлен процесс вскрытия реки Хатанга в 2008 году не примере схемы Алехина, который демонстрирует взаимосвязь динамики уровня воды, температуры воздуха, толщины льда и температуры воды. На графике виден резкий подъем уровня воды, который начался в последней декаде мая и к моменту подвижки льда достиг отметки свыше 600 см. При этом температура воздуха оставалась относительно низкой, с суточными колебаниями около нулевой отметки, а толщина льда на 25 мая зафиксирована на уровне 126 см. Сочетание значительной толщины ледяного покрова и недостаточной суммы положительных температур для его разрушения привело к тому, что вскрытие реки произошло преимущественно под воздействием напора поднимающейся воды половодья, которое сформировалось в верховьях реки раньше, чем началось таяние льда в устье. Это наглядно обосновывает применение гидродинамического метода прогноза (методологии Булатова–Шуляковского) для северотекущих рек, где механический взлом льда играет доминирующую роль.

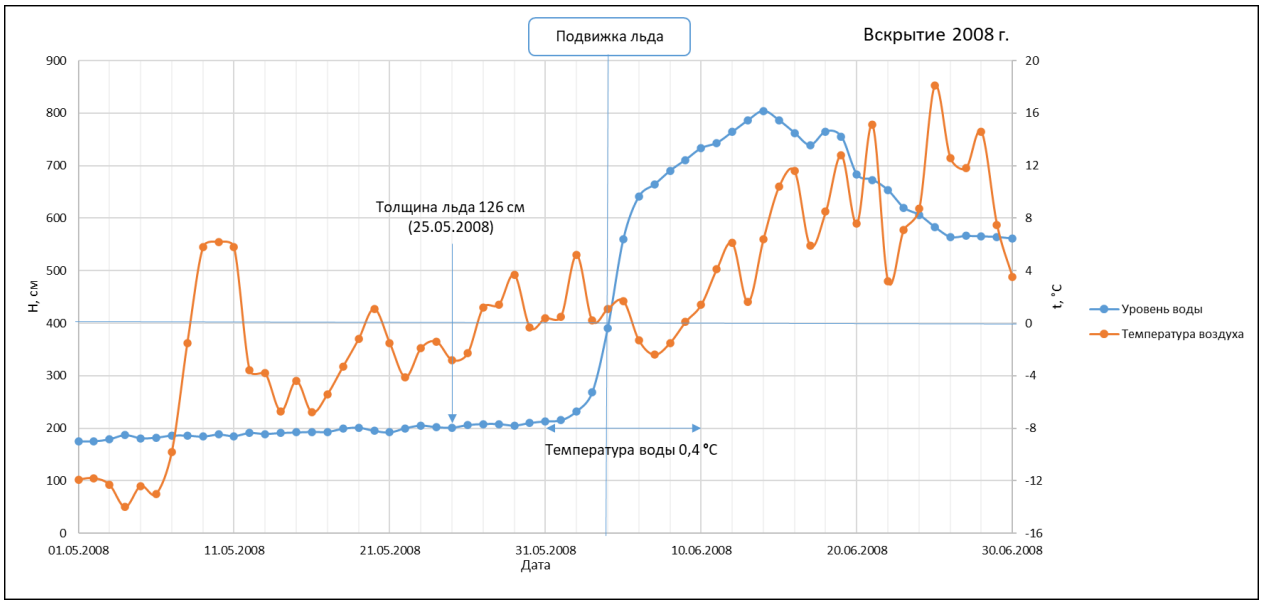


Рисунок 11 – Пример графика по схеме Алехина Ю.М. за 2008 г., р. Хатанга.

Промежуточный вывод

Комплексный анализ многолетних гидрометеорологических данных бассейна реки Хатанга за период 1947–2024 гг. выявил устойчивую тенденцию трансформации климатических условий Арктической зоны.

Анализ хронологического графика температуры воздуха подтвердил наличие статистически значимого тренда на потепление, при этом среднегодовая температура возросла приблизительно на 3 °C за весь период наблюдений. Наибольшая межгодовая изменчивость температур зафиксирована в зимние месяцы (ноябрь–март), что непосредственно влияет на сроки формирования и разрушения ледяного покрова.

Анализ распределения осадков показал существенную неравномерность их выпадения как внутри года, так и по годам. Максимальное количество осадков зафиксировано в 2014 и 2015 годах, что обусловило повышение водности реки в этот период.

Совместный анализ гидрологических и метеорологических данных на примере 2008 года продемонстрировал доминирующую роль гидродинамического фактора в процессе вскрытия реки: интенсивный подъем уровня воды на фоне сохраняющегося прочного ледяного покрова привел к механическому взлому льда, несмотря на низкие температуры воздуха.

Полученные результаты подтверждают необходимость разработки адаптированных методик краткосрочного прогноза ледовых явлений для реки Хатанга, учитывающих нестационарность климатических условий и ускоренное потепление в Арктике.

3.3 Определение расчетного судоходного уровня (РСУ)

Расчетный судоходный уровень (РСУ) – это гидрологическая характеристика, определяющая условия эксплуатации внутренних водных путей. Отметка РСУ устанавливает гарантированные глубины для безопасного

судоходства и является основой для планирования навигации, назначения габаритов судов и оценки рисков при проходе через мелководные участки [13].

Для арктической зоны, где навигационный период ограничен 3-4 месяцами, РСУ выступает не только как нормативная характеристика, но и как критерий готовности к началу навигации.

РСУ всегда принимается ниже и характеризует условия, обеспечивающие минимально допустимую глубину для прохода судов. Для разных классов водных путей назначаются различные значения вероятности превышения.

Для реки Хатанага, которая имеет 1 класс водного пути, расчетная вероятность превышения составляет 2 % (уровень превышается только в 2 % случаев), а расчетная вероятность обеспеченности 99 %, то есть уровень не опускается ниже РСУ в 99 % случаев.

Определение РСУ для участков рек с многолетними наблюдениями производится графоаналитическим методом:

а) определяется расчетная продолжительность физической навигации *T*, сут), для Хатанги это осредненное значение за 2008–2023 гг. равное 119 дн.;

б) определяется допускаемая продолжительность стояния уровня выше РСУ:

k

где *T* – расчетная продолжительность физической навигации, сут;

k – коэффициент допускаемого снижения продолжительности физической навигации.

На реке Хатанга *t* = 6 сут.

в) по данным гидрометрических наблюдений берется 6 день (*t*=6) из периода навигации и строится эмпирическая кривая на клетчатке вероятности рисунок 12).

г) по кривой снимаются значения 2 % (РСУ для надводной высоты подмостового габарита) и 99 % (меженный РСУ) обеспеченностей.

140 см.

910 см.

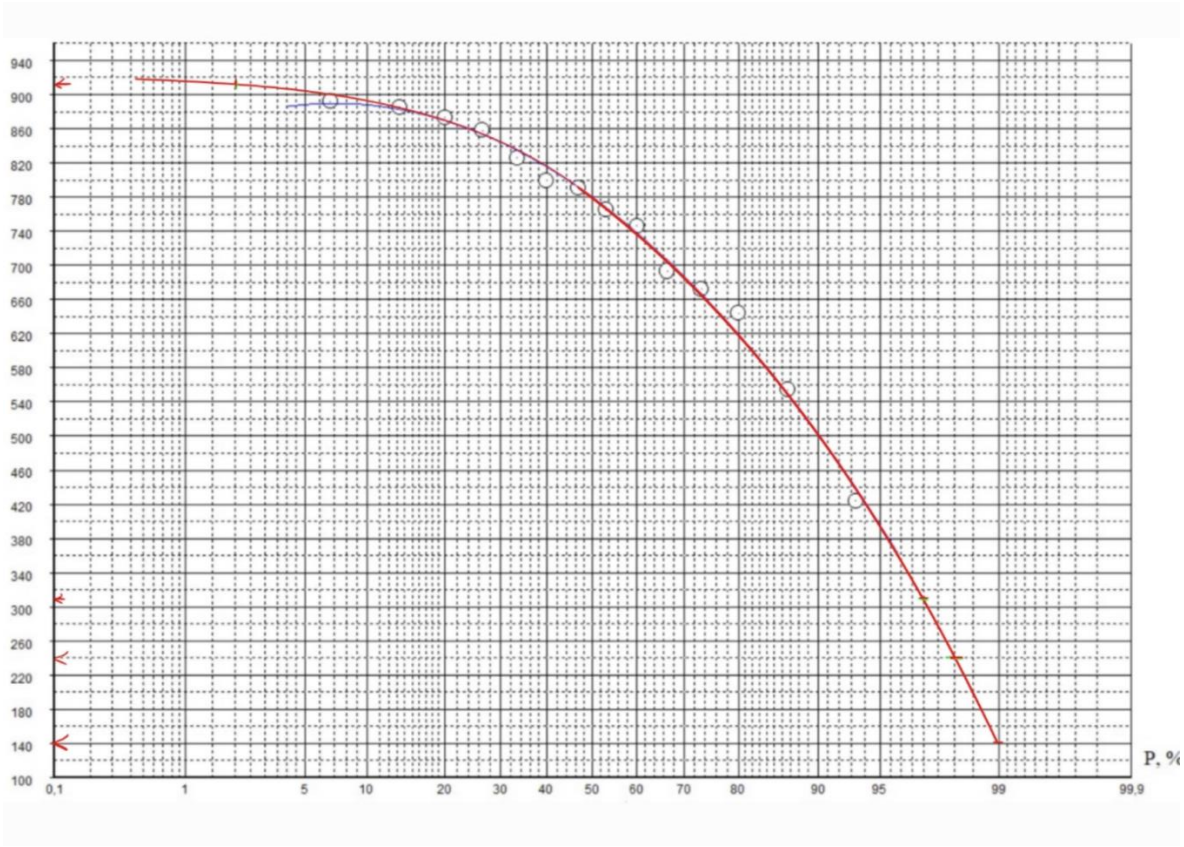


Рисунок 12 – Эмпирическая кривая распределения уровня воды 2008-2023 гг.

4 Разработка методики прогноза ледовых явлений на реке Хатанга

Разработка методики прогноза ледовых явлений на реке Хатанга обусловлена необходимостью адаптации традиционных подходов к условиям ускоренного климатического потепления в Арктике. Как показал анализ, классические эмпирические зависимости по суммам температур теряют надежность из-за быстрых климатических изменений, а физические модели, в большинстве своем, требуют данных, недоступных в связи со слабой изученностью бассейна. В этих условиях лучше обратиться к современным методам машинного обучения, сочетающим устойчивость к трендам и способность соединять разнородные предикторы – термодинамические, гидрологические и ледовые.

Для построения дерева решений будет использован набор предикторов, отобранных на основе физической значимости и доступности данных:

– сумма положительных (весной) или отрицательных (осенью) температур воздуха за расчетный период;
– дата устойчивого перехода температуры через 0 °С;
– дата первой подвижки льда и уровень воды в эту дату;
– дата свободного русла и уровень воды в эту дату;
– толщина ледяного покрова.

Обучение модели будет проводиться на данных за 2008–2024 гг., с последующей верификацией на независимой выборке. Такой подход позволит получить устойчивую к трендам и оперативно применимую методику, дополняющую, а не заменяющую физически обоснованный гидродинамический подход Булатова–Шуляковского.

Аналоги и прототипы методов машинного обучения

Наряду с классическими деревьями решений, есть также метод градиентного бустинга (*Gradient Boosting*). Суть метода заключается в

последовательном построении деревьев решений, где каждая последующая модель компенсирует ошибки предыдущих.

Для задач регрессии (прогноз непрерывных величин, таких как дата свободного русла или толщина льда) наиболее эффективным инструментом является алгоритм *XGBoost* (*Extreme Gradient Boosting*). Его ключевым преимуществом для гидрологических расчетов является наличие встроенной регуляризации, которая предотвращает переобучение модели на зашумленных данных и малых выборках, что характерно для арктических гидрологических постов. Кроме того, *XGBoost* демонстрирует высокую устойчивость к пропущенным значениям в рядах наблюдений, автоматически определяя оптимальные направления разбиения узлов при отсутствии части предикторов.

Работа Канашина С.А. «Применение методов машинного обучения для прогноза осенних ледовых явлений на реке Умбе» [8] посвящена прогнозированию сроков появления устойчивых ледовых явлений (начало ледостава, установление сплошного ледяного покрова) на реке Умба. Автор использовал алгоритмы градиентного бустинга (*XGBoost*) в рамках регрессионного подхода. В качестве предикторов применялись гидрометеорологические характеристики: среднесуточная температура воздуха, сумма отрицательных температур, уровень воды, дата перехода температуры через 0°С. Результаты показали, что *XGBoost* позволяет улавливать сложные нелинейные зависимости между метеорологическими факторами и датами ледовых явлений, обеспечивая точность прогноза в пределах 3–5 суток. Также отмечается устойчивость метода к пропущенным значениям в рядах наблюдений.

Для задач классификации (например, бинарный прогноз «раннее/позднее вскрытие») применяется алгоритм *CatBoost* (*Categorical Boosting*). Он обладает встроенными механизмами работы с несбалансированными данными и позволяет эффективно учитывать не только непрерывные метеорологические предикторы, но и категориальные факторы (например, типы циркуляции атмосферы).

Так, исследование, посвященное прогнозированию ледовых заторов на реке Печоре, выполнено коллективом авторов Иглин С.М., Морейдо В.М. и Головнин К.И. [7]. В работе применялся алгоритм *CatBoost* для решения задачи бинарной классификации — определения вероятности возникновения ледового затора в устьевой части реки. Основная проблема работы, что заторы наблюдались лишь в 15–20% случаев из выборки за 30 лет. Для решения этой проблемы был предложен метод дополнения обучающей выборки искусственно сгенерированными событиями, что позволило повысить точность модели на редких классах с 62% до 87%. Результаты подтвердили эффективность *CatBoost* для работы с категориальными признаками и несбалансированными данными.

Внедрение данных методов позволяет преодолеть ограничения классического линейного регрессионного анализа. Деревья решений и их ансамбли автоматически выявляют такие скрытые пороговые значения, обеспечивая более высокую точность прогнозов в условиях нестационарности климата.

Методы градиентного бустинга, такие как *XGBoost* и *CatBoost* имеют много плюсов, однако их эффективное применение требует значительно большего объема обучающей выборки (обычно от сотен и тысяч строк). Применение сложных ансамблей на малой выборке (как в случае с рекой Хатанга) с высокой вероятностью привело бы к сильному переобучению. Поэтому в данной работе был выбран классический метод множественной регрессии и базовое дерево решений, которые обладают высокой интерпретируемостью и устойчивы на коротких рядах данных. Однако разработанный алгоритм и база данных создают фундамент для внедрения *XGBoost* в будущем, по мере накопления новых данных.

4.1 Прогнозирование ледовых явлений методом регрессии

В основе прогноза ледового режима лежит установление зависимостей между характеристиками ледовых явлений и факторами, определяющими их формирование. Регрессионный анализ позволяет найти эти связи и получить прогностические уравнения, которые можно будет использовать [11]. Первым этапом является анализ взаимодействий между предикторами и прогнозируемой переменной, для чего строится корреляционная матрица.

Корреляционная матрица – это таблица, в которой представлены коэффициенты корреляции между множеством переменных Коэффициент изменяется от –1 до +1 и показывает силу и направление линейной связи между двумя переменными. Значение 1 и –1 указывает на идеальную связь, 0 – на отсутствие линейной связи [10].

Прогноз даты свободного русла

Так, в таблице 1 представлена корреляционная матрица гидрометеорологических характеристик ледового режима реки Хатанга, которые нужны для прогнозирования даты свободного русла. Наиболее сильные связи наблюдаются между датой первой подвижки льда и датой свободного русла, датой подвижки и количеством дней до устойчивого перехода температуры воздуха через 0, суммой положительных температур и датой освобождения русла.

Таблица 1 – Корреляционная матрица (вскрытие)

	1	2	3	4	5	6	7
1	1						
2	0,779	1					
3	–0,529	–0,571	1				
4	0,123	–0,124	0,202	1			
5	0,113	0,313	–0,161	0,240	1		

	1	2	3	4	5	6	7
6	0,116	0,321	0,211	0,133	–0,009	1	
7	–0,480	–0,240	–0,130	–0,128	0,383	–0,043	1

1) Дата свободного русла от начала года
2) Дата первой подвижки льда от начала года
3) Сумма положительных температур воздуха
4) Толщина льда
5) Уровень при подвижке
6) Кол-во дней от начала года до устойчивого перехода $t_{возд}$ через ноль
7) Свободное русло раньше 161 дней (10 июня)

Прогноз даты свободного русла делается на основе данных 2008–2023 гг., 2021 и 2023 не были учтены при определении коэффициентов для уравнения регрессии в целях дальнейшей проверки регрессионной модели.

Изначально был сформирован расширенный пул потенциальных предикторов и для выявления наиболее устойчивой зависимости проводился пошаговый перебор предикторов в различных комбинациях. В таблице 2 представлены данные, которые были взяты для прогноза. Для исключения переобучения и оценки реальной прогностической способности модели применялась проверка на независимой выборке: уравнение основывалось на основном ряде наблюдений, а затем проверялось на двух последних годах, не участвовавших в подборе коэффициентов.

Таблица 2 – Исходные данные для прогноза даты свободного русла

Год	Дата свободного русла, № дня	Дата первой подвижки льда, № дня	Сумма положительных температур воздуха, °C	Свободное русло раньше 161 дней (10 июня)	Толщина льда, см
2008	158	155	35,8	1	126
2009	171	155	7,1	0	150

Год	Дата свободного русла, № дня	Дата первой подвижки льда, № дня	Сумма положительных температур воздуха, °C	Свободное русло раньше 161 дней (10 июня)	Толщина льда, см
2010	161	145	50,5	0	161
2011	150	147	38,2	1	138
2012	152	143	7,3	1	107
2014	155	147	31,2	1	138
2015	162	152	9,9	0	138
2016	164	156	7,8	0	105
2017	167	158	19,2	0	115
2018	160	150	11,4	1	119
2019	159	152	0	1	114
2020	150	142	98,3	0	113
2021	163	150	25,2	1	112
2023	162	152	2	0	103

Результаты регрессионной статистики:

– множественная R = 0,945 (сильная линейная связь между предикторами и датой вскрытия);

– R^2 = 0,893 (модель объясняет 89,3% изменчивости данных);

– нормированный R^2 = 0,833;

– стандартная ошибка = 2,69 (в среднем прогноз отклоняется от фактического на 2–3 дня).

Итоговое уравнение имеет вид:

$$Y \text{ (дата свободного русла)} = 63{,}1+0{,}6*X1+(-0{,}09)*X2+(-5{,}9)*X3+0{,}085*X4.$$

На рисунке 13 представлено сопоставление фактических дат наступления ледового явления (исходный ряд) и соответствующих прогнозных значений. На графике видно, что прогнозная кривая демонстрирует высокую степень

согласованности с эмпирическими данными. Максимальные расхождения наблюдаются в 2011, 2015, 2018 и 2021 годах.

2021 и 2023 год были построены на независимой выборке и отражают устойчивые связи и правильно подобранные предикторы. Для обучения модели был принят предиктор «Свободное русло до 161 дня», однако, при проверке на годах, не участвовавших в обучении, он исключался из расчетного уравнения так как в реальных условиях прогноза мы не можем знать заранее, освободится ли русло до 10 июня. Без данного предиктора уравнение регрессии также показывает более точный результат.

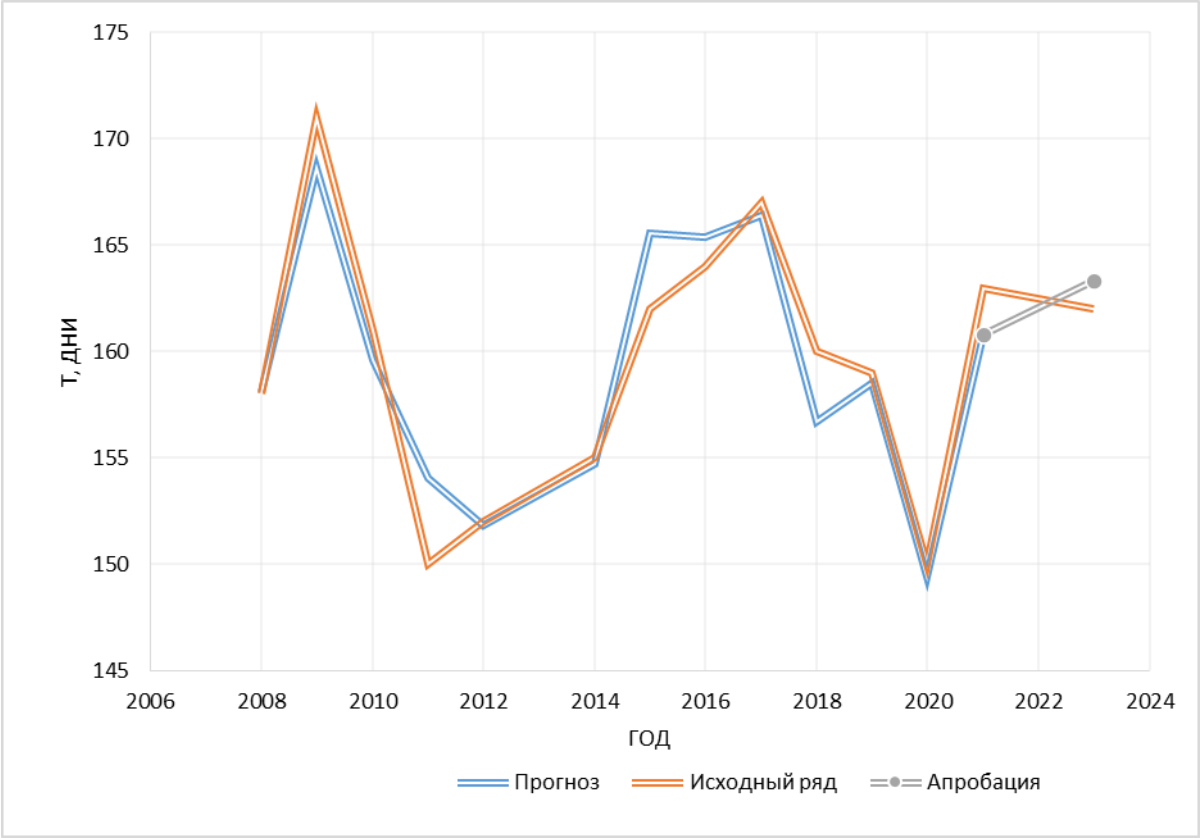


Рисунок 13 – График фактических и прогнозных дат свободного русла.

Для оценки качества разработанной методики прогноза даты свободного русла рассчитанные погрешности сравнивались с допустимыми значениями, установленными для краткосрочных гидрологических прогнозов ледовых явлений. Согласно нормативным требованиям, допустимая погрешность прогноза (δдоп) зависит от заблаговременности:

- при заблаговременности 2–3 суток δдоп = ±1 сут,
- 4–5 суток — ±2 сут,
- 6–9 суток — ±3 сут,
- 10–13 суток — ±4 сут,
- 14–15 суток — ±5 сут.

Анализ графика сопоставления фактических и прогнозных значений (рисунок 13) показал, что разработанная регрессионная модель обеспечивает высокую точность прогноза: среднеквадратическая ошибка на обучающей выборке составила 3 сут, что соответствует допустимой погрешности при заблаговременности прогноза 6–9 суток. На независимой выборке (2021 и 2023 гг.) отклонения прогноза от фактических дат вскрытия не превысили 3 суток, что укладывается в нормативные требования для заблаговременности 6–9 суток. Наибольшие расхождения наблюдаются в 2009, 2015 и 2021 годах, но даже в эти погодно-климатические условия погрешность не выходит за пределы ±3 суток. Таким образом, разработанная методика может быть рекомендована для оперативного прогнозирования сроков вскрытия реки Хатанга с заблаговременностью до 7–10 суток, что обеспечивает достаточный временной интервал для планирования навигации и подготовки морского торгового порта Хатанга к началу свободного ото льда периода.

Прогноз даты установления ледостава

В качестве предикторов для прогноза изначально рассматривались следующие характеристики:

1) дата установления ледостава (прогнозируемая характеристика);
2) средняя температура воздуха в сентябре;
3) сумма отрицательных температур воздуха;
4) толщина льда;
5) последняя измеренная температура воды;
6) дата перехода среднесуточной температуры воздуха через 0°C;
7) уровень воды;

8) продолжительность периода свободного русла (требует знание заблаговременности).

Но так как нельзя достоверно знать уровень воды в дату замерзания и продолжительность периода свободного русла, данные предикторы были убраны из прогноза.

Анализ корреляционной матрицы (таблица 3) показал некоторую сильную связь между выбранными предикторами и датой установления ледостава. Лучшую связь с датой замерзания проявляет дата перехода среднесуточной температуры через 0°С. Остальные же предикторы имеют либо слабые корреляции ($|r|$ <0,3), либо средние связи между большинством пар. Наибольшую корреляцию среди оставшихся показали сумма отрицательных температур и последняя измеренная температура воды.

Таблица 3 – Корреляционная матрица (замерзание)

	1	2	3	4	5	6
1	1					
2	0,41197	1				
3	-0,16313	-0,12449	1			
4	-0,434722	-0,25143	0,067214	1		
5	-0,46467	-0,24877	0,509144	-0,40325	1	
6	0,867937	0,25591	0,187052	0,304526	-0,17083	1

Результаты регрессионной статистики:

– множественная R = 0,97 (сильная линейная связь между предикторами и датой установления ледостава);

– R^2 = 0,945 (модель объясняет 94,5 % изменчивости данных);

– нормированный R^2 = 0,898;

– стандартная ошибка = 1,97 (в среднем прогноз отклоняется от фактического на 2 дня).

Итоговое уравнение даты установления ледостава имеет вид:

$$Y = 110+0,977*X1+(–0,154)*X2+0,446*X3+(–0,074)*X4+0,582*X5.$$

Как видно на рисунке 14, значения 2021 и 2023 гг. отклонились от фактических на 5 и 1 дней соответственно.

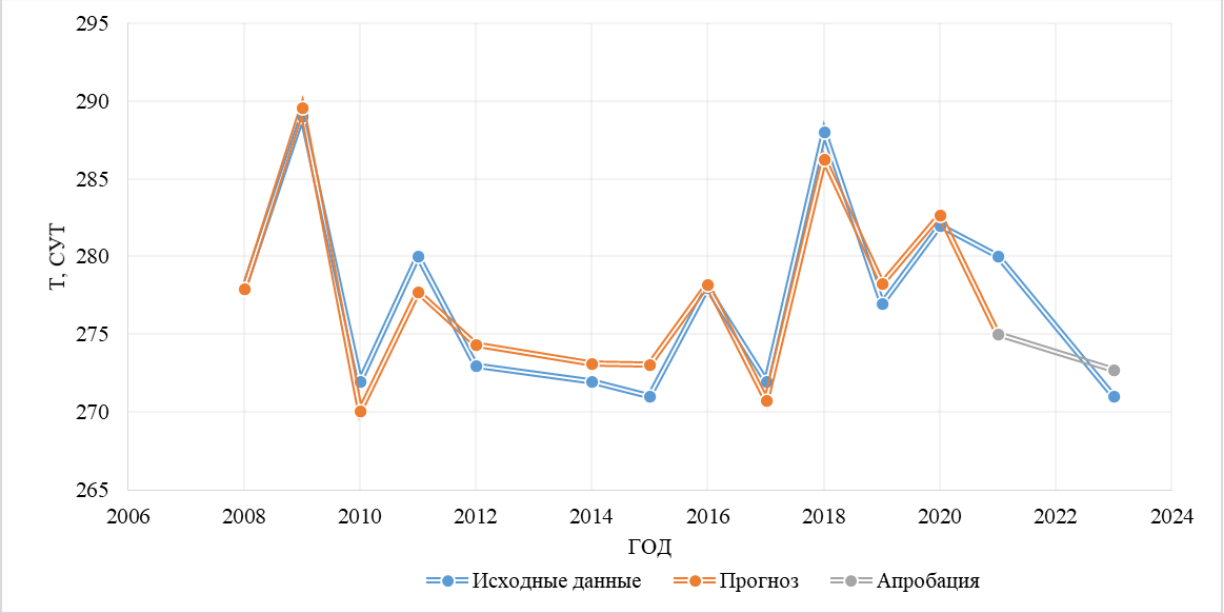


Рисунок 14 – Фактические и прогнозные даты установления ледостава.

Анализ рисунка 13 показал, что разработанная регрессионная модель обеспечивает высокую точность прогноза: среднеквадратическая ошибка составила 2 сут, что соответствует допустимой погрешности при заблаговременности прогноза 4–5 суток. Визуально на графике прослеживается высокая степень согласованности прогнозной кривой с эмпирическими данными: модель корректно воспроизводит как тренд изменения сроков ледостава, так и его межгодовую изменчивость. Результаты на независимой выборке 2021 и 2023 гг.: прогнозное значение в 2021 различается на 5 суток с фактическим, а в 2023 прогноз практически совпадает с фактическим, расхождение составляет менее 1 суток.

Прогнозирование периода свободного русла

Для выполнения прогноза были использованы данные:

1) Период свободного русла, сут.;
2) Дата первой подвижки льда от начала года;
3) Толщина льда перед вскрытием реки;
4) Уровень воды при подвижке льда;
5) Среднемесячная температура воды в сентябре;
6) Толщина льда при замерзании реки.

Период обучения модели: 2008-2020 гг.

Независимая выборка для проверки: 2021 и 2023 гг.

В таблице 4 представлена корреляционная матрица. Особо сильной связи не выражено, практически все связи между характеристиками либо умеренные, либо слабые. Параметры регрессии получились следующими:

– множественная R = 0,956 (сильная линейная связь между предикторами и датой вскрытия);

– R^2 = 0,915 (модель объясняет 91,2% изменчивости данных);

– нормированный R^2 = 0,844;

– стандартная ошибка = 3,29 (в среднем прогноз отклоняется от фактического на 3 дня).

Итоговое уравнение периода свободного русла имеет вид:

$$Y = 275+(–1,17)*X1+(–0,175)*X2+0,034*X3+3,77*X4+0,912*X5.$$

Таблица 4 – Корреляционная матрица (период свободного русла)

	1	2	3	4	5	6
1	1					
2	–0,55	1				
3	–0,05	–0,12	1			
4	0,07	0,31	0,24	1		
5	0,59	–0,22	0,002	–0,37	1	

	1	2	3	4	5	6
6	0,10	0,25	0,28	0,11	–0,12	1

В таблице 5 указаны исходные данные для прогнозирования периода свободного русла.

Таблица 5 – Исходные данные для прогнозирования периода свободного русла

Год	Период свободного русла, сут	Дата первой подвижки льда, № дня	Толщина льда при вскрытии, см	Уровень при подвижке, см	Ср. темп. воды в сентябре, °С	Толщина льда при замерзании, см
2008	120	155	126	391	7,8	7
2009	118	155	150	508	6,2	8
2010	111	145	161	291	5,9	3
2011	130	147	138	616	7	0
2012	121	143	107	175	6,4	0
2014	117	147	138	597	3,8	8
2015	109	152	138	282	5,1	7
2016	114	156	105	299	7,7	3
2017	105	158	115	514	2,9	4
2018	128	150	119	409	5,5	13
2019	118	152	114	578	5,7	2
2020	132	142	113	257	7,8	4
2021	117	150	112	453	4,3	2
2023	109	152	103	346	4,6	2

На представленном графике (рисунок 15) показано сравнение фактических и прогнозных периодов свободного русла.

Анализ графика: хорошее совпадение фактических и расчетных данных, наибольшие значения наблюдаются в отдельные годы с экстремальными значениями.

2021 и 2023 года были выделены в независимую выборку и не использовались при построении модели, погрешность составила в 2021 году 3 дня, а в 2023 – 1 день.



Рисунок 15 – Фактические и прогнозные периоды свободного русла.

Анализ рисунка 15 показал высокую точность разработанной регрессионной модели: среднеквадратическая ошибка составила 3 сут, что соответствует допустимой погрешности при заблаговременности прогноза 6–9 суток.

На независимой выборке прогнозное значение практически совпадает с фактическим, расхождение составляет 3 суток в 2021 году и 1 сутки в 2023 году, что подтверждает устойчивость выявленных статистических связей и отсутствие переобучения модели.

Наибольшие отклонения между прогнозными и фактическими значениями наблюдаются в 2011 и 2014 годах, однако они не превышают 5 суток и укладывается в нормативные требования для заблаговременности до 15 суток. Таким образом, разработанная методика может быть рекомендована для оперативного прогнозирования продолжительности периода свободного русла реки Хатанга с заблаговременностью до 14–15 суток.

4.2 Описание методологических основ разрабатываемой методики, основанной на дереве решений

При разработке методики прогнозирования имеет значение правильный выбор математической модели. В случае машинного обучения и статистического моделирования существуют два основных подхода: классификация (отнесение объектов к классам или категориям) и регрессионный анализ (прогнозирование непрерывных числовых значений).

Целевая переменная для задачи регрессии – это дата свободного русла, для классификации вскрытие раньше определенной даты.

4.3 Алгоритм прогноза

Для разработки методики прогноза ледовых явлений на реке Хатанга был использован метод деревьев решений (*Classification and Regression Trees*), реализованный в приложении *STATISTICA* с помощью функции *General Classification and Regression Tree Models* (Общие модели деревьев классификации и регрессии). Метод представляет собой алгоритм машинного обучения, который строит ветвистую структуру для принятия решений путем разбиения исходной выборки на множества. В отличие от классических регрессионных моделей, деревья решений не требуют предположений о линейности связей.

Принцип работы алгоритма

a) разбиение данных: алгоритм последовательно разделяет исходное множество наблюдений на однородные подгруппы (узлы) на основе пороговых значений предикторов.

b) критерии качества разбиения:

Для задач классификации (бинарный прогноз: да/нет или 1/0) используется индекс Джини (*Gini index*), который показывает степень неоднородности узла:

$$G = 1 - \sum_{i=1}^{k} P_i^2,$$

где P_i – доля объектов i-го класса в узле.

с) остановка роста дерева: процесс разбиения продолжается до тех пор, пока не будет достигнут один из критериев остановки:

- минимальное количество наблюдений в узле
- максимальная глубина дерева
- недостаточное уменьшение ошибки при дальнейшем разбиении

Визуализация данных

ID – идентификатор узла;

N – количество наблюдений в узле;

Mu – среднее значение целевой переменной (вероятность для классификации);

Var – дисперсия, чем меньше, тем надежнее прогноз (мера неоднородности узла).

Исходные данные для построения деревьев решений

Для каждого вида прогноза был сформирован набор предикторов.

Прогноз свободного русла

Целевая переменная: Свободное русло раньше 161 дня (10 июня), бинарная переменная (1 – да, 0 – нет)

Предикторы:

- дата первой подвижки льда от начала года (характеризует начало активной фазы разрушения ледяного покрова);
- уровень воды при подвижке (отражает гидродинамическую нагрузку на ледяной покров);
- количество дней от первой подвижки до свободного русла (показывает продолжительность ледохода);
- толщина льда (определяет механическую прочность покрова);

– количество дней от начала года до устойчивого перехода температуры воздуха через ноль (характеризует термический режим весны);

– сумма положительных температур воздуха (интегральная характеристика теплового воздействия на лед).

Предикторы выбраны с учетом доминирующего механического фактора вскрытия на реке Хатанга.

На рисунке 16 представлен прогноз свободного русла методом классификации, дерево решений. Данные за 2021 и 2023 гг. не участвовали в обучении для дальнейшей апробации метода.

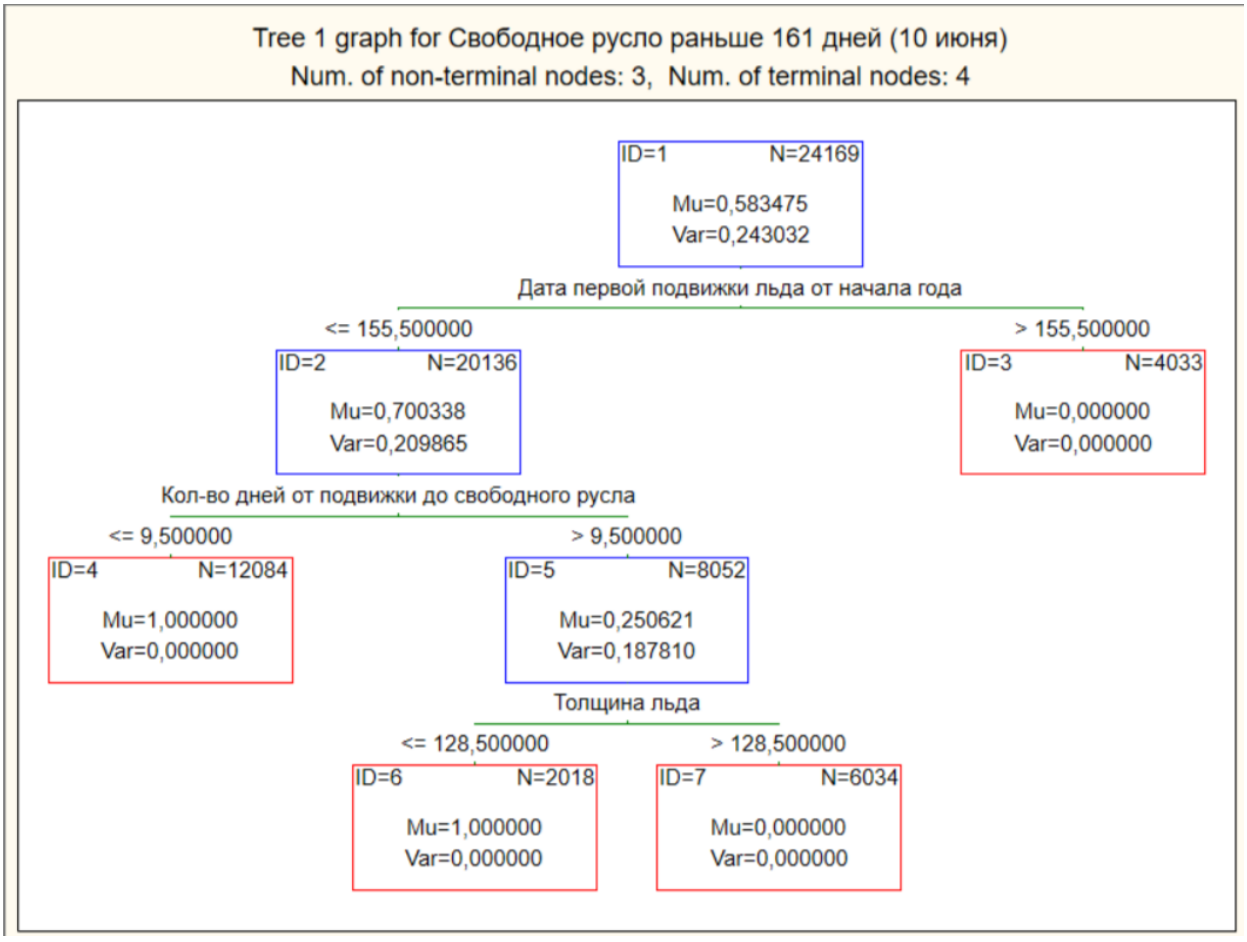


Рисунок 16 – Прогноз свободного русла методом классификации, дерево решений.

Прогноз установления ледостава

Целевая переменная: замерзание позже 277 дней, бинарная переменная (1 – да, 0 – нет).

Предикторы:

– средняя температура воды в сентябре (характеризует тепловой запас водной массы перед ледоставом);

– сумма отрицательных температур воздуха (определяет интенсивность охлаждения);

– толщина льда (на момент прогноза) (показывает текущее состояние ледяного покрова);

– последняя измеренная температура воды (оперативная характеристика термического режима);

– дата перехода среднесуточной температуры воздуха через 0°C (обозначает начало осеннего похолодания).

Формирование ледостава определяется балансом между потерей тепла водной поверхностью и тепловым запасом воды. Температура воды в сентябре и дата перехода воздуха через 0°C характеризуют начало процесса, а сумма отрицательных температур – его интенсивность.

На рисунке 17 представлен прогноз установления ледостава методом классификации, дерево решений. Данные за 2021 и 2023 гг. не участвовали в обучении для дальнейшей апробации метода.

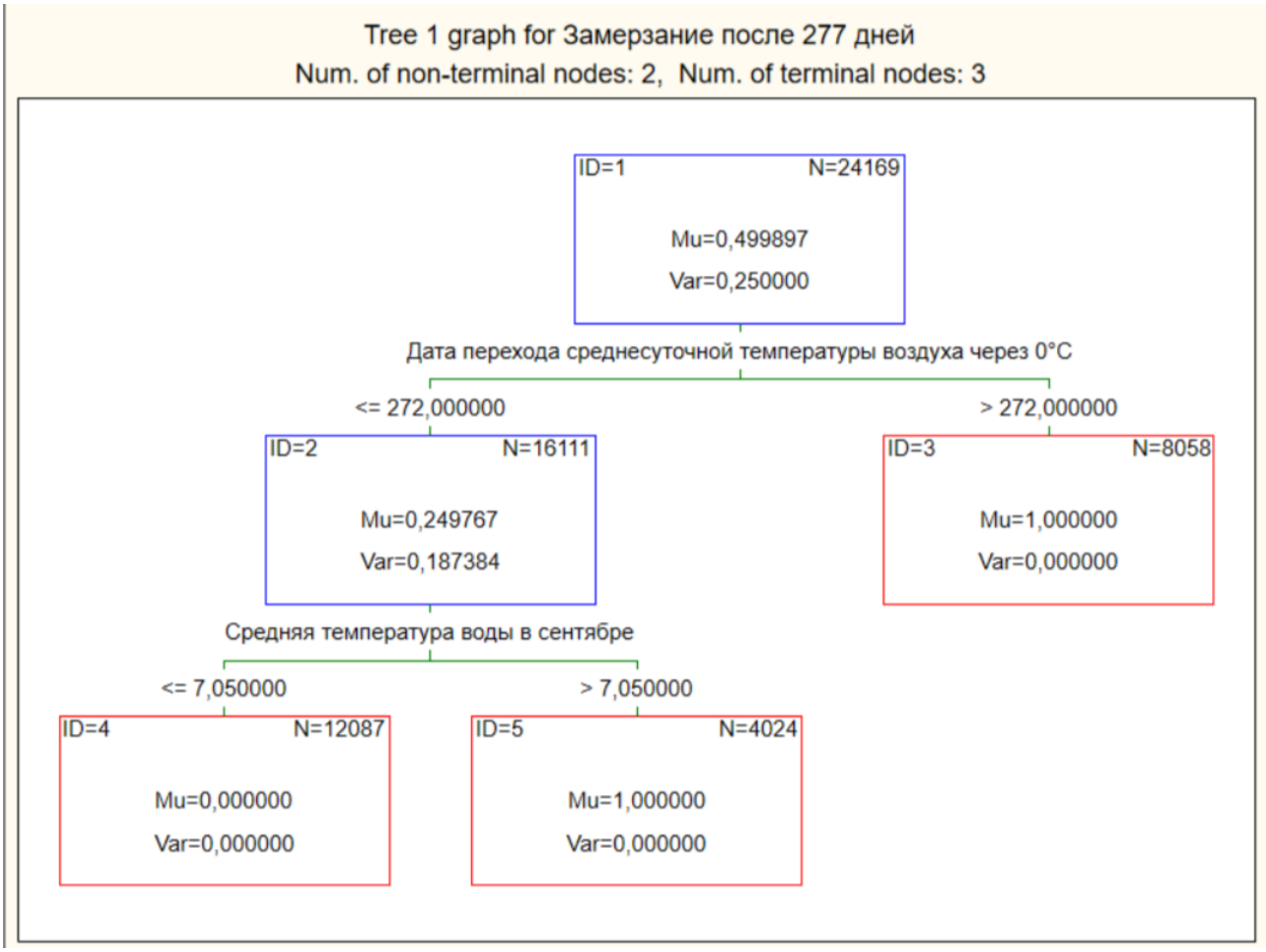


Рисунок 17 – Прогноз установления ледостава методом классификации, дерево решений.

Прогноз периода свободного русла

Целевая переменная: период свободного русла более 120 суток, бинарная переменная (1 – да, 0 – нет).

Предикторы:

– дата первой подвижки льда от начала года;
– толщина льда (перед вскрытием);
– уровень воды при подвижке;
– средняя температура воды в сентябре;
– толщина льда (при замерзании).

Продолжительность навигационного периода определяется разницей между датами вскрытия и замерзания.

На рисунке 18 представлен прогноз определения периода свободного русла методом классификации, дерево решений. Данные за 2021 и 2023 гг. не участвовали в обучении для дальнейшей апробации метода.

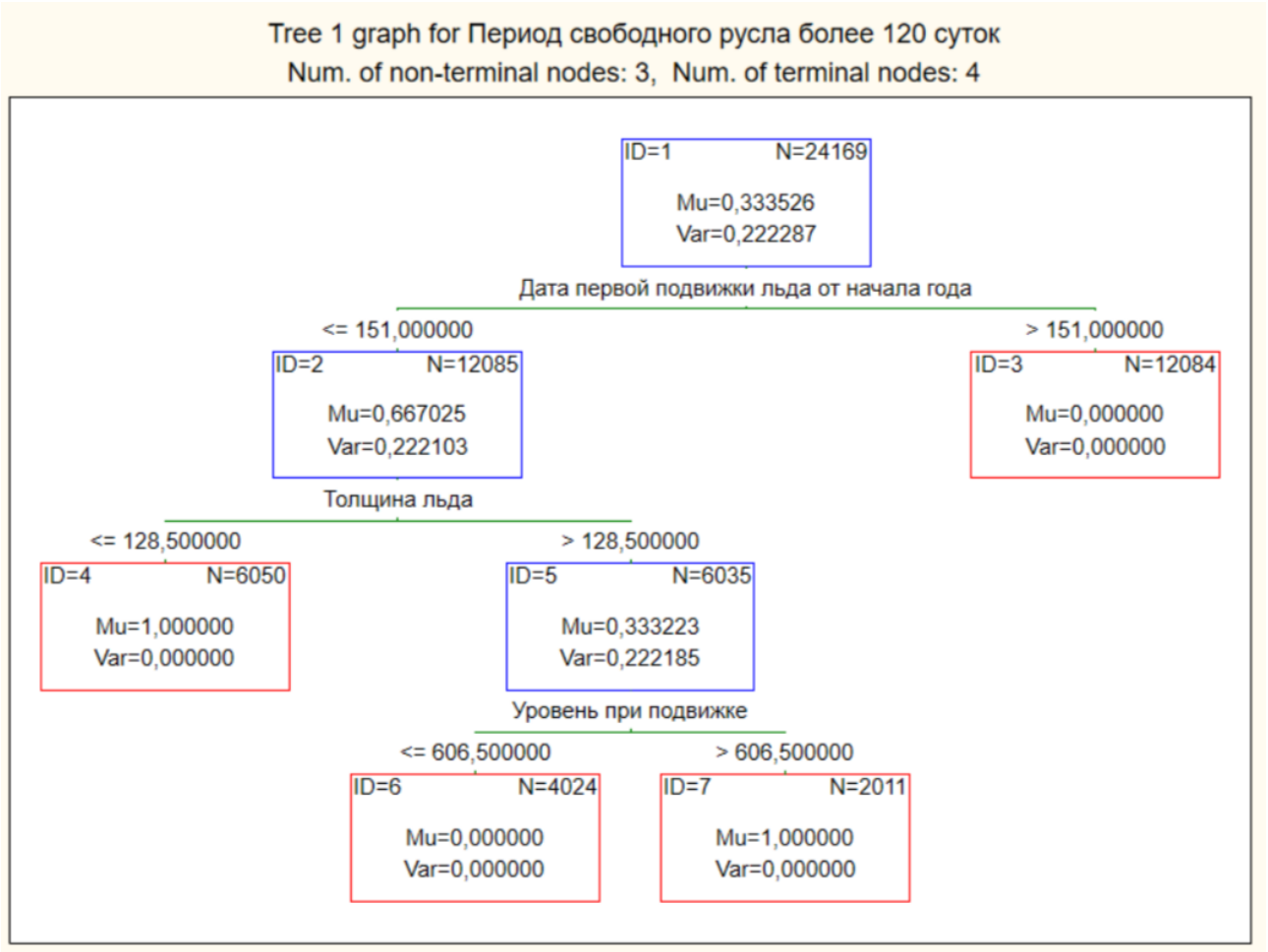


Рисунок 18 – Прогноз определения периода свободного русла методом классификации, дерево решений

4.4 Апробация метода прогноза

Апробация прогноза свободного русла

Первое дерево решений построено для бинарной классификации: Свободное русло раньше 161 дня (10 июня) (1 – да, 0 – нет). На рисунке 16

представлена структура дерева, состоящего из 3 нетерминальных и 4 терминальных узлов.

Основными предикторами, определяющими структуру дерева, стали:

– дата первой подвижки льда от начала года (пороговое значение 155,5 дней);

– количество дней от подвижки до свободного русла (порог 9,5 дней);

– толщина льда (порог 128,5 см).

При проверке модели на независимой выборке (2021 и 2023 гг.) были получены верные прогнозы. Прогноз и фактические данные совпадают, свободное русло на реке будет раньше 161 дня.

Высокая точность объясняется тем, что дерево решений успешно выявило пороговые значения предикторов, характеризующие переход между ранним и поздним вскрытием.

Апробация прогноза установления ледостава

Второе дерево решений построено для задачи: замерзание после 277 дня (1 – да, 0 – нет). Дерево состоит из 2 нетерминальных и 3 терминальных узлов (рисунок 17).

При проверке модели на независимой выборке (2021 и 2023 гг.) был получен верный прогноз за 2021 год и неверный за 2023 год.

Апробация прогноза определения периода свободного русла

Третье дерево решений построено для задачи: период свободного русла более 120 суток (1 – да, 0 – нет). Дерево состоит из 3 нетерминальных и 4 терминальных узлов (рисунок 18).

При проверке модели на независимой выборке (2021 и 2023 гг.) был получен неверный прогноз за 2021 год и верный за 2023 год.

Сравнительный анализ методов регрессии и деревьев решений

Проведенное в работе исследование позволяет провести сравнительный анализ двух примененных подходов к прогнозированию ледовых явлений: классического множественного регрессионного анализа и метода деревьев

решений. Оба метода показали свою применимость для условий реки Хатанга, однако имеют различную природу, формат выдаваемого результата и практическую ценность.

Метод множественной регрессии позволил получить прогноз точной даты наступления ледового явления (в днях от начала года). Главным преимуществом регрессии является высокая точность на малых выборках (12–14 лет наблюдений) и возможность расчета допустимой погрешности (стандартная ошибка 2–3 суток), что соответствует нормативным требованиям к краткосрочным гидрологическим прогнозам. Однако регрессионный анализ предполагает наличие линейных связей между предикторами и целевой переменной, что в условиях нестационарного климата Арктики может приводить к потере надежности при выходе значений факторов за пределы исторического диапазона.

Метод деревьев решений, напротив, ориентирован на решение задач бинарной классификации. Модель отвечает на важный для эксплуатации порта вопрос: «Произойдет ли вскрытие раньше критической даты (10 июня)?». Ключевым достоинством деревьев решений является автоматическое выявление физических пороговых значений (например, порог подвижки льда в 155,5 дня или толщины льда 128,5 см), при которых резко меняется вероятность события.

Анализ показал, что данные методы не являются взаимозаменяемыми, а взаимодополняющими. Регрессионная модель дает гидрологу точный ориентир по срокам, а дерево решений служит инструментом оперативной оценки рисков.

В условиях короткого арктического навигационного периода и жестких логистических требований морского порта Хатанга, комплексное применение обоих методов позволяет выпускать наиболее обоснованные и надежные прогностические документы, учитывающие как точные сроки, так и вероятностные риски отклонения от нормы.

Заключение

В условиях ускоренного климатического потепления в Арктической зоне разработка адаптированных методик прогнозирования ледовых явлений приобретает большую актуальность для обеспечения безопасности судоходства и эффективности работы транспортных узлов. Река Хатанга обеспечивает доступ к морскому торговому порту, демонстрирует устойчивую трансформацию ледового режима, требующую пересмотра традиционных подходов к прогнозированию.

В ходе проведенного исследования достигнута поставленная цель – оценено влияние современных климатических трендов на ледовый режим реки Хатанга и предложена оптимальная методика прогноза ледовых явлений, устойчивая к изменяющимся условиям. Для достижения цели были решены все поставленные задачи.

В результате анализа физико-географических и гидрометеорологических особенностей бассейна реки Хатанга установлено, что доминирующим фактором весеннего вскрытия является гидродинамический механизм – взлом ледяного покрова под действием напора половодья, формирующегося в южных районах бассейна. Осенние ледовые явления в значительной степени определяются термодинамическими условиями и температурой воды. Выявлена устойчивая тенденция к потеплению климата, что приводит к сокращению продолжительности ледостава и увеличению межгодовой изменчивости дат вскрытия и замерзания.

Оценка эффективности традиционных эмпирических методик показала, что классические зависимости, основанные на суммах температур, теряют надежность в условиях нестационарного климата. Физико-статистические модели требуют данных о снежном покрове и других параметрах, которые, в большинстве, недоступны а арктической зоне. Гидродинамический подход Булатова–Шуляковского, хотя и наиболее обоснован физически, требует данных о расходах воды, которые также отсутствуют на посту Хатанга.

В результате формирования базы гидрометеорологических данных создан массив наблюдений за период 2008–2024 гг., включающий уровни воды, толщины льда, температуры воды и воздуха, а также даты ледовых явлений. База данных позволила провести корреляционно-регрессионный анализ и выявить статистически значимые связи между предикторами и целевыми переменными.

Разработка и апробация методики прогноза с использованием регрессионных моделей показала следующие результаты:

Модель прогноза даты свободного русла обеспечивает высокую точность (R^2 = 0,893, стандартная ошибка 3 сут) и может быть рекомендована для оперативного прогнозирования с заблаговременностью 6–9 суток;

Модель прогноза даты установления ледостава демонстрирует высокую надежность (R^2 = 0,945, стандартная ошибка 2 сут) и может быть рекомендована для прогнозирования с заблаговременностью 4–5 суток;

Модель прогноза продолжительности периода свободного русла показывает хорошую точность (R^2 = 0,915, стандартная ошибка 3 сут) и пригодна для планирования навигации.

Разработка методики на основе деревьев решений позволила создать бинарные прогностические модели, автоматически выявляющие пороговые значения предикторов. Деревья решений показали высокую точность для прогноза раннего вскрытия (до 10 июня).

Практические рекомендации по использованию разработанной методики включают:

– выпуск краткосрочных прогнозов даты вскрытия на основе регрессионной модели с использованием предикторов: дата подвижки льда, уровень воды при подвижке, толщина льда и сумма положительных температур;

– использование деревьев решений для бинарного прогноза «раннее/позднее вскрытие»;

– применение модели периода свободного русла для планирования продолжительности навигационного периода;

– регулярная проверка и обновление моделей с учетом накопления новых данных и климатических трендов.

Перспективы дальнейших исследований включают:

– расширение базы данных за счет привлечения информации со смежных постов и методов восстановления пропущенных значений;

– внедрение ансамблевых методов машинного обучения (градиентный бустинг, случайный лес) при накоплении достаточного объема данных.

Таким образом, разработанная методика прогноза ледовых явлений на реке Хатанга, основанная на сочетании регрессионного анализа и деревьев решений, обеспечивает надежное прогнозирование весеннего вскрытия и продолжительности навигационного периода в условиях ускоряющегося климатического потепления. Методика может быть внедрена в оперативную практику гидрологических прогнозов для обеспечения безопасности судоходства и эффективности работы морского торгового порта Хатанга.

Список литературы

1. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) [Электронный ресурс]. – URL: https://aisgmv.gosmonitoring.ru/ (дата обращения: 20.10.2025).

2. Булатов С. Н., Шуляковский Л. Г. Краткосрочные прогнозы ледовых явлений на реках. – Л.: Гидрометеоиздат, 1978. – 184 с.

3. Будыркина А. П. Метод долгосрочного прогноза сроков вскрытия р. Хатанги и Хатангского залива. – Л., 1961. – 138 с.

4. Гайдукова Е. В., Викторова Н. В. Гидрологические прогнозы: конспект лекций. – СПб.: РГГМУ, 2021. – 92 с.

5. Георгиевский Ю. М. Краткосрочные гидрологические прогнозы. – Л.: ЛПИ, 1982. – 100 с.

6. Георгиевский Ю. М., Шаночкин С. В. Гидрологические прогнозы. – СПб.: изд. РГГМУ, 2007. – 436 с.

7. Иглин С.М., Морейдо В.М., Головнин К.И. Прогнозирование редких гидрологических явлений методами машинного обучения на примере ледовых заторов на реке Печоре // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2025. Т. 80. № 1. С. 87–97.

8. Канашин С. А. Применение методов машинного обучения для прогноза осенних ледовых явлений на реке Умбе // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2025. Т. 52. С. 52–64.

9. Никитина П. А., Бродская Н. А. Техногенное воздействие на природные воды бассейна реки Хатанга // Труды I Всероссийской научно-практической конференции «Гидрогеология 2021». – М.: Издательство «Перо», 2021. – С. 66–73.

10. Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. – СПб.: изд. РГГМУ, 2007. – 279 с.

11. Сикан А.В. Методические указания по дисциплине «Гидрологические расчеты». Часть I. – СПб.: РГГМУ, 2012. – 52 с.

12. Сикан А.В., Винокуров И.О., Дрегваль М.С. Учебное пособие по дисциплине «Гидрологические расчеты». Часть II. – СПб.: РГГМУ, 2023. – 36 с.

13. Свод правил СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Стройиздат, 2004. – 72 с.

14. Хатанга (река) // Большая российская энциклопедия [Электронный ресурс]. – URL: https://bigenc.ru/c/khatanga-f0e1e3 (дата обращения: 27.11.2025).

15. Официальный сайт Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) [Электронный ресурс]. – URL: http://meteo.ru/ (дата обращения: 23.11.2025).

16. Хатанга (река) // РУВИКИ [Электронный ресурс]. – URL: https://ru.ruwiki.ru/wiki/Хатанга_(река) (дата обращения: 29.11.2025).

17. История порта // Хатангский морской торговый порт [Электронный ресурс]. – URL: https://www.hatanga.su/company/history/ (дата обращения: 2.12.2025).

18. Мониторинг метеорологических условий // Экстремальный климат [Электронный ресурс]. – URL: http://extremeclimate.ru/monitoring/meteo/ (дата обращения: 23.01.2026).

19. Характеристика объекта исследований: устьевая область р. Хатанги // Палеополярный архив ААНИИ [Электронный ресурс]. – URL: https://paleopolar.aari.ru/izmeneniyaurovnyamorya/arktika?view=article&id=69:khatangskij-zaliv&catid=53 (дата обращения: 14.03.2026).