



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра инженерной гидрологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

Математическое моделирование ледовой

обстановки в бассейне реки Мезень

На тему

Исполнитель Ситникова Яна Андреевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель К.Т.Н. ДОЦЕНТ
(ученая степень, ученое звание)

Хаустов Виталий Александрович
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

К.Т.Н. ДОЦЕНТ
(ученая степень, ученое звание)

Гайдукова Екатерина Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«16» мая 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

Содержание

Введение	3
1 Река Мезень и физико-географическое описание исследуемой территории..	6
1.1 Общая характеристика реки Мезень.....	6
1.2 Особенности ледового режима	7
1.3 Характеристика водосборного бассейна.....	9
1.4 Климат	10
2 Оценка изменений температурного режима водосбора реки Мезень за период 1991 – 2023 гг.....	12
2.1 Исходные данные.....	12
2.1.1 Данные реанализа ERA5.....	14
2.1.2 Интегральные показатели температуры	16
2.2 Методика исследования.....	16
2.3 Результаты исследования	19
2.4 Выводы 2 главы.....	27
3 Математическое моделирование ледовой обстановки в бассейне реки Мезень.....	28
3.1 Математический аппарат.....	29
3.1.1 Кластерный анализ	29
3.1.2 Эмпирические уравнения, основанные на решении задачи Стефана	31
3.2 Моделирование ледовой обстановки русловой части реки Мезень....	36
3.2.1 Результаты кластерного анализа.....	37
3.2.2 Моделирование и прогноз толщины льда.....	41
3.3 Моделирование ледовой обстановки Мезенского залива.....	51
3.3.1 Результаты моделирования расчетных толщин льда Мезенского залива.....	52
3.4 Общие выводы по результатам 3 главы	55
4 Оценка динамики влияния климатических изменений на ледовый режим реки Мезень	58
4.1 Оценка изменения продолжительности устойчивого ледостава на реке Мезень за период 2009 – 2022 гг.	58

4.1.2	Изменчивость ледового режима в характерные суровые и мягкие зимы.....	60
4.1.3	Распределение толщины льда русловой зоны реки Мезень в суровые и мягкие зимы.....	61
4.2	Ледовый режим Мезенского залива в суровые и мягкие зимы	66
4.3	Выводы 4 главы.....	67
	Заключение.....	69
	Список использованных источников	71
	Приложение А – Линейная аппроксимация трендом интегральных показателей температуры.	76
	Приложение Б – Значимость трендов интегральных температурных показателей ($\alpha = 5\%$, $t_{кр}=2$)	97
	Приложение В – Результаты прогноза среднегодовой толщины льда по 2-ум видам эмпирических зависимостей.....	100

Введение

Ледовый режим рек северной части Европейской территории России отличается значительной сложностью и неоднородностью условий. Формирование и развитие ледового покрова зависят от множества факторов – метеорологических особенностей, гидрологического режима, морфологии русла и т.д. В современных условиях глобального потепления климата проблема изучения ледовой обстановки рек приобретает особую актуальность, поскольку температурные сдвиги ведут к изменению ледового режима и возникновению опасных природных явлений (заторов льда, увеличивающих риск затопления прилегающих территорий). Это создает угрозу для прибрежных населенных пунктов, гидротехнических сооружений и условий судоходства.

Одним из эффективных инструментов поиска и описания количественного представления взаимодействия гидрометеорологических параметров являются методы многомерного статистического анализа (МСА). МСА дает возможность группировать исходные данные и выделять на их основе однородные районы по условиям формирования ледового покрова, что значительно упрощает последующую обработку параметров и интерпретацию результатов. Также подобный подход важен для дифференцированного прогноза и управления рисками в каждом районе.

Наряду со статистическими методами в гидрологической практике широко применяются эмпирические уравнения для расчета и прогнозирования ледовых характеристик. Подобные зависимости выводятся на основе многолетних наблюдений и отражают усредненную связь ледовых явлений с метеорологическими факторами. Они имеют важное практическое значение, позволяя получать оперативные оценки параметров ледового режима без привлечения сложных физических моделей. Однако при условии климатических изменений необходима перепроверка коэффициентов и структуры таких уравнений. Формулы, выведенные на метеорологических данных прошлых

климатических периодов, могут давать систематические погрешности при применении в современных реалиях. Поэтому актуальной задачей является переоценка существующих эмпирических зависимостей, выявление границ их применимости и при необходимости – калибровка поправочных коэффициентов, либо разработка новых формул, учитывающих современные тенденции климата.

В качестве объекта исследования была выбрана река Мезень, включая ее водосборный бассейн, русловую и устьевую (Мезенская губа Белого моря) области. Предметом исследования являлись закономерности формирования, развития и разрушения ледового покрова исследуемого объекта в условиях изменяющегося климата, а также эмпирические методы моделирования и прогнозирования толщины льда как одного из самых важных параметров ледовой обстановки.

На начальном этапе была собрана база гидрометеорологических данных. Для этого использовались многолетние ряды метеорологических наблюдений с 15 метеостанций, расположенных на территории водосбора реки Мезень и его пределами. А также данные с 10 пунктов гидрологических наблюдений. Кроме того, были привлечены данные модельного реанализа как дополнительного источника для районов, где отсутствуют прямые наблюдения.

В рамках настоящего исследования интегрированы климатический и гидрологический анализ с использованием методов статистики и МСА, применены эмпирические зависимости, а также картографическая обработка результатов для наглядной визуализации.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Проанализировать многолетние изменения температурного режима водосбора реки Мезень и выявить климатические тенденции последних десятилетий.

2. Исследовать особенности ледового режима русловой части реки Мезень с проведением районирования по однородности условий ледообразования

3. Оценить применимость и сравнить существующие эмпирические формулы для расчета и прогноза толщины льда применительно к условиям руслового и устьевого участков. При необходимости скорректировать параметры этих зависимостей.

4. Выявить влияние климатических изменений на динамику ледового режима реки Мезень и Мезенского залива.

5. Визуализировать и обобщить полученные результаты в форме карт и схем для наглядной демонстрации выявленных пространственно-временных закономерностей ледовой обстановки за многолетний период.

Научная новизна заключается в разработке и апробировании комплексного подхода к анализу и моделированию ледовой обстановки одной из крупных рек северной части ЕТР с учетом современных климатических изменений.

1 Река Мезень и физико-географическое описание исследуемой территории

1.1 Общая характеристика реки Мезень

Река Мезень – одна из крупнейших водных артерий северной части Европейской территории России (ЕТР), охватывающая Архангельскую область и республику Коми. Исток расположен в болотах западных склонов Тиманского кряжа, а устье – в Мезенской губе Белого моря. Длина реки составляет 966 км, площадь водосборного бассейна – 78000 км² (Рис. 1.1.1).



Рисунок 1.1.1 – Схема водосборного бассейна реки Мезень

Речной сток Мезени отличается неоднородностью условий. Верхний участок русла обладает большим количеством порогов, перекатов и мелких каскадов при глубине около 6 – 8 м. На данном участке рельеф имеет выраженный уклон, что приводит к ускоренному стоку воды, а русловая гидродинамика способствует вырубке береговых слоев и формированию оврагов. По мере продвижения вниз по течению русло Мезени начинает расширяться, и река переходит в среднее течение с глубиной 10 – 15 м. Характер русла часто меняется за счет притоков и ответвлений, что приводит к образованию расширений и участков меандрирования. В этих местах скорость потока уменьшается, а гидравлические условия становятся более стабильными, что способствует накоплению донных отложений и формированию разветвленного ложа. Нижнее течение Мезени выражено значительным расширением русла и сильным снижением уклона. Здесь река достигает своей устьевой зоны и формирует эстуарий [Ситникова Я.А., 2023; Сумачев А.Э., 2022].

Эстуарий представляет собой воронкообразное расширение, где происходит активное смешение речных и морских вод. Также в данных условиях значительное влияние на гидродинамику оказывают приливные процессы: морские приливы могут приводить к изменению глубины и распределению донных отложений в эстуарной зоне. В Мезенском заливе приливные волны достигают 9 – 9,5 м, а перемешивание вод создает сложное распределение скоростей течений, когда речной сток постепенно уступает место морским потокам. [Демиденко Н.А., 2016].

1.2 Особенности ледового режима

Ледовый режим Мезени, представляющий собой многоступенчатый процесс, включает три основных этапа: замерзание, период ледостава и вскрытие. На них влияет совокупность климатических факторов, внутренних гидродинамических процессов и морфологических особенностей русла.

Замерзание начинается при устойчивом переходе температуры воздуха через 0°C к отрицательным значениям, сопровождаясь образованием на водной поверхности тонких ледовых слоев – заберегов. Они возникают преимущественно в прибрежных зонах, где малые глубины и небольшой расход воды позволяют водной поверхности быстро охлаждаться. Забереги имеют относительно прозрачную структуру и малую толщину, но именно они закладывают основу для формирования устойчивого ледового покрова при дальнейшем понижении температуры воздуха.

Период ледостава характеризуется стабильной отрицательной температурой воды и воздуха. Это способствует продолжительному процессу кристаллизации и увеличению толщины льда за счет дальнейшего роста кристаллической структуры. При этом внутренняя структура льда становится более однородной, а контакты между отдельными ледовыми массами обеспечивают его прочность и устойчивость. Данный этап характеризуется отсутствием заметного движения ледового покрова.

Процесс вскрытия льда начинается с устойчивого перехода температуры воздуха через 0°C к положительным значениям. После подвижек и разрушения ледового покрова начинается ледоход. Разнообразие русловых процессов влияет на интенсивность и продолжительность ледохода на разных участках реки.

В зонах с резкими изменениями геоморфологических характеристик могут наблюдаться ледовые заторы, способные приводить к кратковременному подъему уровня воды. Процесс таяния льда также протекает неоднородно: на открытых участках русла он происходит быстрее, а в заторных зонах – с разрывами [Донченко Р.В., 1987].

Период начала замерзания эстуария Мезени наступает при устойчивом переходе температуры воздуха через 0°C к отрицательным значениям, сопровождаясь образованием на прибрежных мелководьях первых фракций шуги и ниласа, которые закрепляются на дне и закладывают базу для последующего ледообразования. В условиях эстуария забереги быстро уплотняются и трансформируются в сплоченный лед, а у берегов образуется

припай толщиной до 10 – 15 см. В период ледостава, который на акватории Мезенского залива длится около 160 дней с ноября – декабря по апрель – май, непрерывное кристаллизационное нарастание приводит к увеличению толщины льда до 30 – 40 см. Внутренняя структура льда приобретает однородность благодаря многократным циклам оттепелей и повторных замерзаний. Морские приливно-отливные колебания в эстуарии задерживают выпадение снега на лед и способствуют его уплотнению, но также создают зоны разнотолщинного покрова и мелкие полыньи в местах повышенного течения. Этап вскрытия начинается с прогрева воздуха выше 0°С и приведения теплового баланса льда к положительному, что способствует образованию закраин и полыней вдоль берегов эстуария. Усиленный дрейф и разрушение льда провоцируются сочетанием весенних штормовых ветров и подъема уровня воды, что приводит к формированию ледохода и возможным заторам в узких участках эстуария. Полное освобождение ото льда происходит к концу апреля – середине мая [Демиденко Н.А., 2016; Терский П.Н. и др., 2021].

1.3 Характеристика водосборного бассейна

Водосборный бассейн Мезени расположен в Восточно-Европейской геоморфологической стране и относится к IV Онего-Мезенской провинции синклинальных пластовых и ярусных равнин, а также включается в состав Беломорской низменной пластовой аллювиально-морской равнины. Геологическая структура данного района определяется чередованием древних осадочных, метаморфических и пластовых пород. Местность, охватываемая водосбором, характеризуется наличием двух основных геологических структур: на западе – Балтийского кристаллического щита, а на востоке – Тиманского кряжа. Между ними располагается Онего-Двино-Мезенская впадина, по которой с юга на север происходит понижение поверхности, определяющее направление русла реки. Рельеф бассейна Мезени преимущественно равнинный, с едва выраженным возвышенно-низинным членением. На Балтийском

кристаллическом щите ярко выражены моренные гряды, озы и крупные ледниковые валуны. Тиманский кряж представлен плоскими куполовидными поднятиями с высотами до 471 м. Леса занимают около 80% территории, а болота – около 17%, что придает ландшафту характерную мозаичность.

Почвогрунтовой комплекс изучаемой территории характеризуется преобладанием глееподзолистых почв. На болотистых участках встречаются дополнительные разновидности почв, обладающие высокой влагоемкостью. [Научные журналы России].

1.4 Климат

Климат изучаемой территории является переходным от морского к континентальному и относится к промежуточной зоне между умеренным морским и субарктическим климатическими поясами. Зима длится 6 – 7 месяцев и характеризуется средними температурами января около минус 12 °С (абсолютный минимум минус 46°С). Лето короткое и умеренно теплое с июльской средней температурой около плюс 12°С (абсолютный максимум плюс 34°С). Обильные осадки (до 785 мм в год на западном склоне Тимана) и высокая относительная влажность (81%) создают условия избыточного увлажнения. Ветровой режим со средней скоростью около 4 м/с усиливает холодный эффект зимой и способствует испарению в теплый период.

Климатические условия формируются под воздействием комплекса физико-географических условий. Одним из основных факторов является продолжение теплого океанического течения Гольфстрим, который обеспечивает приток теплой морской воды на север, что смягчает зимнюю температуру и влияет на формирование облачности. Благодаря этому течению зимой наблюдаются не столь экстремальные морозы по сравнению с внутренними районами, а летом – более стабильное повышение температуры воздуха [Gulf Stream] (Рис. 1.4.1).

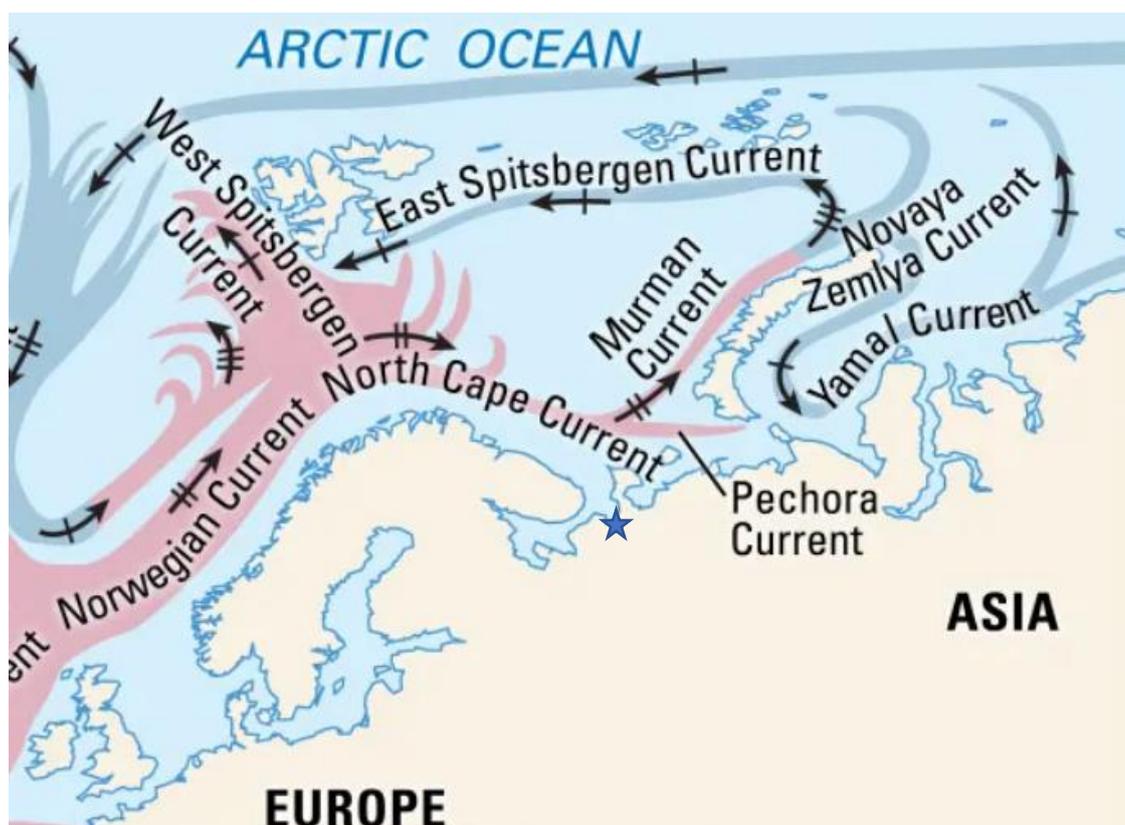


Рисунок 1.4.1 – Схема распространения теплых течений Гольфстрима до бассейна реки Мезень

Также регион характеризуется активной циркуляцией нескольких типов воздушных масс. Преобладающие влажные атлантические воздушные массы умеренных широт приносят циклональные осадки и смягчают зимние температуры воздуха. В холодный период территорию захватывают арктические воздушные массы с Баренцева и Белого морей, что вызывает резкое похолодание и усиление ветров. Летом проявляется влияние континентальных воздушных масс из внутренних районов Восточной Европы и Сибири, приводя к относительно сухим и теплым периодам с большой суточной амплитудой температур. Кроме глобальных факторов климатической динамики региона большую роль играют локальные условия, определяемые рельефом, почвами и растительностью. Таежные леса создают условия микроклимата, отличающегося более высокой стабильностью температурных режимов в сравнении с открытыми равнинными территориями [Климатические данные городов по всему миру; Восточно-Европейская равнина].

2 Оценка изменений температурного режима водосбора реки Мезень за период 1991 – 2023 гг.

В последние десятилетия четко прослеживается нестационарность климата, характеризующаяся возрастающими тенденциями приземной температуры воздуха, влияние которых особо выражено в Арктической зоне России [Жилина И.Ю., 2021].

Изменения климатических условий непосредственно отражаются на ледовом режиме рек. В статьях [Вуглинский В.С., 2014] и [Георгиевский М.В. др., 2021] отмечается сокращение продолжительности ледостава и снижение максимальной толщины ледового покрова, а также смещение сроков начала ледообразования на реках севера ЕТР.

В данной главе представлена оценка изменений температурного режима водосбора реки Мезень за период 1991 – 2023 гг. Выбранный временной интервал (34 года) соответствует климатическому периоду [World Meteorological organization], что позволяет провести оценку долгосрочных температурных изменений на исследуемой территории. Помимо анализа водосбора Мезени, учтены данные с метеостанций прилегающих территорий (от Архангельска до Нарьян-Мара) для получения целостного представления о региональных климатических процессах.

2.1 Исходные данные

В качестве исходных данных выступали ежедневные значения измеренной температуры воздуха с 15 метеостанций государственной наблюдательной сети, расположенных в пределах изучаемой территории (Рис. 2.1.1, Табл. 2.1.1).

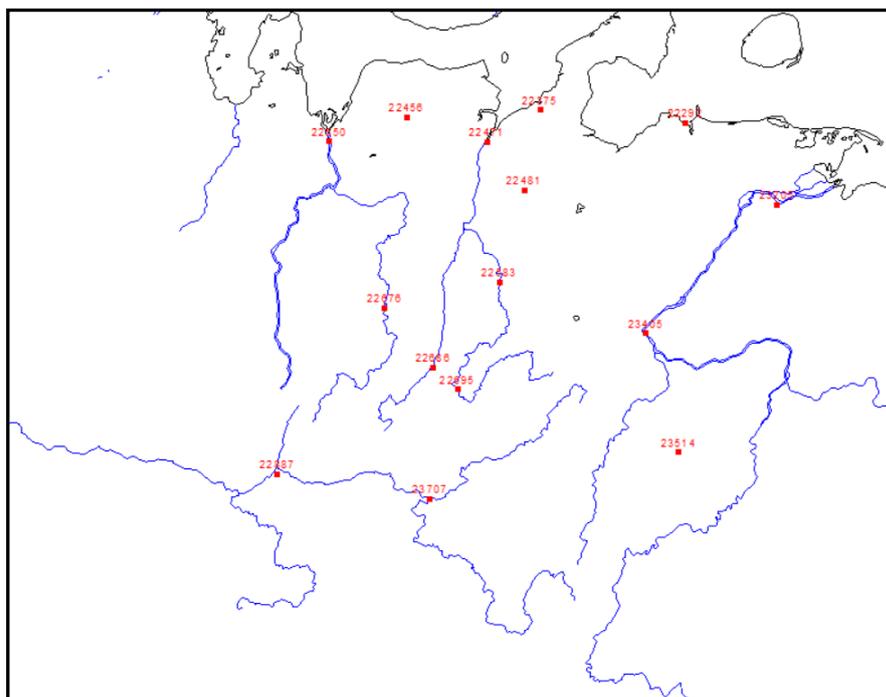


Рисунок 2.1.1 – Схема пространственного расположения метеостанций

Таблица 2.1.1 – Список метеостанций

Номер	Название	Координаты
22292	Индига	67.68; 48.68
22471	Мезень	65.87; 44.22
22550	Архангельск	64.5; 40.73
22583	Койнас	64.75; 47.65
22676	Сура	63.58; 45.63
22887	Котлас	61.23; 46.72
23205	Нарьян-Мар	67.63; 53.02
23405	Усть-Цильма	65.43; 52.27
23514	Ираель	64.52; 55.4
23707	Усть-Вымь	62.23; 50.42
22686	Вендинга	63.45; 47.92
22456	Кепино	65.38; 41.83
22695	Кослан	63.45; 48.92
22481	Мосеево	65.77; 46.2
22375	Несь	66.6; 44.7

Данные наблюдений получены с сайта <http://aisori-m.meteo.ru>, который разработан по технологии АИСОРИ и сопровождается Всероссийским научно-исследовательским институтом гидрометеорологической информации – Мировым центром данных (ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД») [ВНИИГМИ – МЦД].

Для 5 метеостанций (Вендинга, Кепино, Кослан, Мосеево, Несь) значения ежедневной температуры воздуха были получены с помощью данных модельного реанализа в связи с отсутствием доступа к рядам наблюдений на сайте <http://aisori-m.meteo.ru>.

2.1.1 Данные реанализа ERA5

В последние годы широкое применение получили глобальные климатические архивы, в которых первичные наблюдения на метеостанциях подвергнуты обработке и приведены к узлам регулярной сетки. При построении сеточных архивов используются различные методы пространственной интерполяции и сложного модельного реанализа.

В исследовании использовался общедоступный сеточный архив на сайте <https://www.ecmwf.int> [ECMWF/50]. для приземной температуры воздуха, полученный посредством модельного реанализа ERA5 с обработкой результатов с помощью программного обеспечения Open-Meteo [Free Open-Source...].

Данный архив разработан в Европейском центре прогноза погоды (ECMWF) в рамках программы «Коперник». Он содержит массивы метеоданных с 1-часовым временным разрешением в узлах регулярной сетки $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ с пространственным разрешением примерно 31 км за период с 1950 г. по настоящее время (архив обновляется в реальном времени). Также существует вариант архива с массивом данных с суточным разрешением

Для верификации точности значений приземной температуры воздуха сеточного архива (ECMWF) проводился сравнительный анализ с данными наблюдений на станциях государственной наблюдательной сети, представленными на сайте <http://rp5.ru> [Расписание погоды] (2013 и 2023) [Горгуца Р.Ю., Миронов М.Е., 2025].

В качестве критерия соответствия данных выступал коэффициент корреляции и индекс предсказательной способности WI [Кантаржи И.Г., 2020]. В таблице 2.1.1.1 представлены результаты анализа.

Таблица 2.1.1.1 – Статистическая оценка качества данных архива ECMWF в сравнении с измеренными среднесуточными температурами воздуха на станциях государственной наблюдательной сети

Среднесуточная температура воздуха, годы	Среднеквадратичное отклонение, °С	Коэффициент корреляции R	Индекс предсказательной способности WI
Вендинга			
2013	1,60	0,993	0,996
2023	1,71	0,992	0,995
Кепино			
2013	1,82	0,998	0,993
2023	1,70	0,990	0,994
Кослан			
2013	1,32	0,995	0,997
2023	1,30	0,995	0,997
Мосеево			
2013	1,72	0,992	0,995
2023	1,51	0,994	0,996
Несь			
2013	1,32	0,991	0,993
2023	1,34	0,992	0,994

Анализ сравнения данных за 2013 и 2023 гг. показал, что среднеквадратическое отклонение не превышает 2°С, а коэффициент корреляции и индекс предсказательной способности $WI > 0,99$ для всех рассматриваемых метеостанций. Полученные результаты свидетельствуют о том, что использование ежедневных данных приземной температуры воздуха сеточного архива (ECMWF) за период 1991 – 2023 для рассматриваемых метеостанций является целесообразным.

2.1.2 Интегральные показатели температуры

На основе собранных данных температуры воздуха за весь период наблюдений в специальной программе [Ромашкова К.В., 2019] были рассчитаны ее интегральные показатели – даты устойчивых переходов через 0°C в осенний (начало холодного периода) и весенний (окончание холодного периода) сезоны, число дней продолжительности теплого и холодного периодов, а также суммы отрицательных и положительных температур для каждой рассматриваемой метеостанции.

2.2 Методика исследования

Для количественной оценки временной изменчивости интегральных температурных характеристик за период 1991 – 2023 гг. использовался метод аппроксимации линейным трендом, имеющим вид уравнения:

$$y = ax + b, \quad (2.2.1)$$

где a – коэффициент наклона прямой тренда; x – независимая переменная; b – свободный член тренда.

На рисунках 2.2.1 – 2.2.3 показан пример линейной аппроксимации температурных характеристик для метеостанции Койнас за период 1991 – 2023 гг. Линейные аппроксимации трендом интегральных показателей температуры для других метеостанций представлены в приложении А.

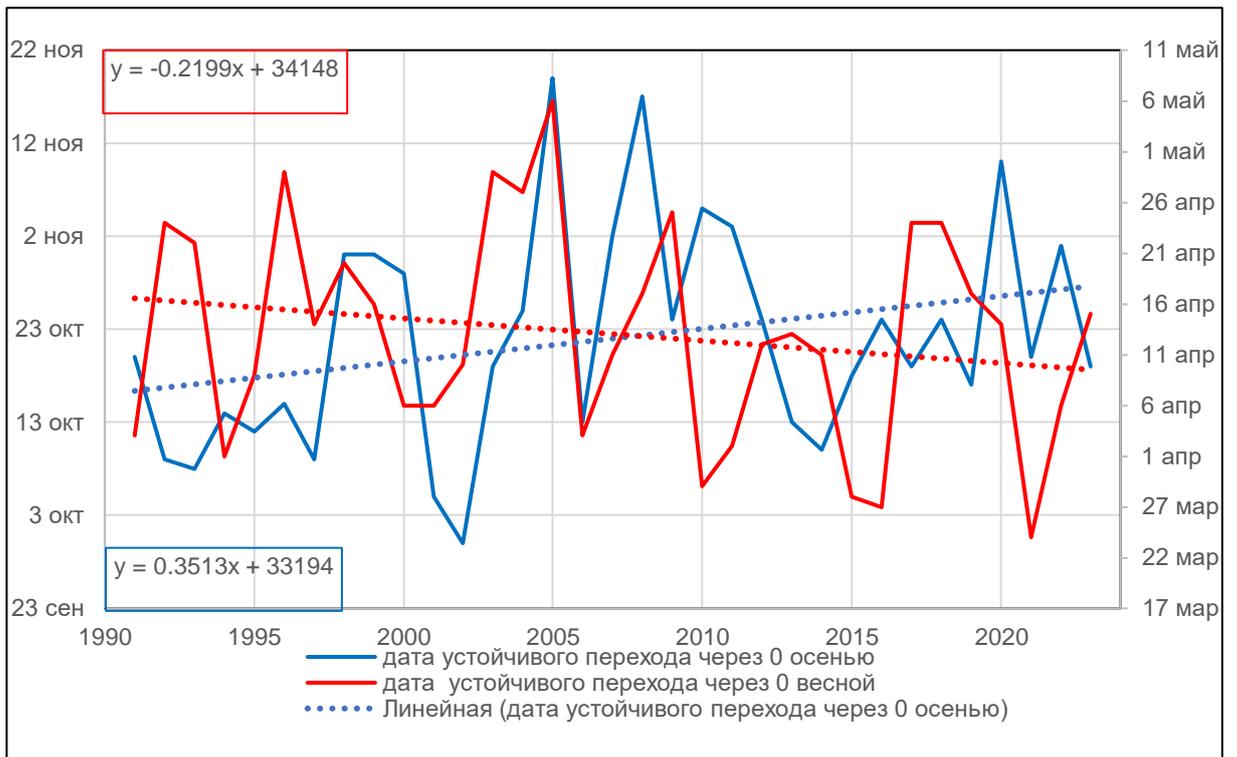


Рисунок 2.2.1 – Линейная аппроксимация трендом дат устойчивых переходов осенью и весной для метеостанции Койнас

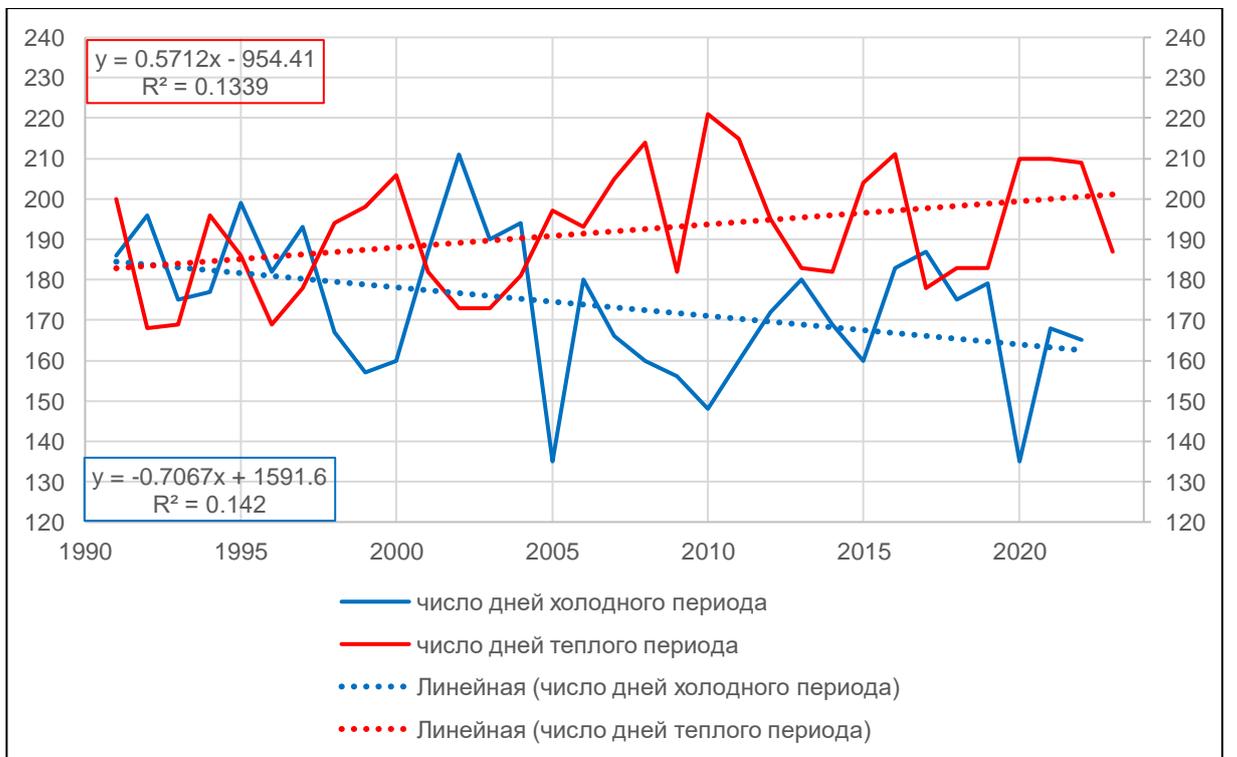


Рисунок 2.2.2 – Линейная аппроксимация трендом продолжительности теплого и холодного периодов для метеостанции Койнас

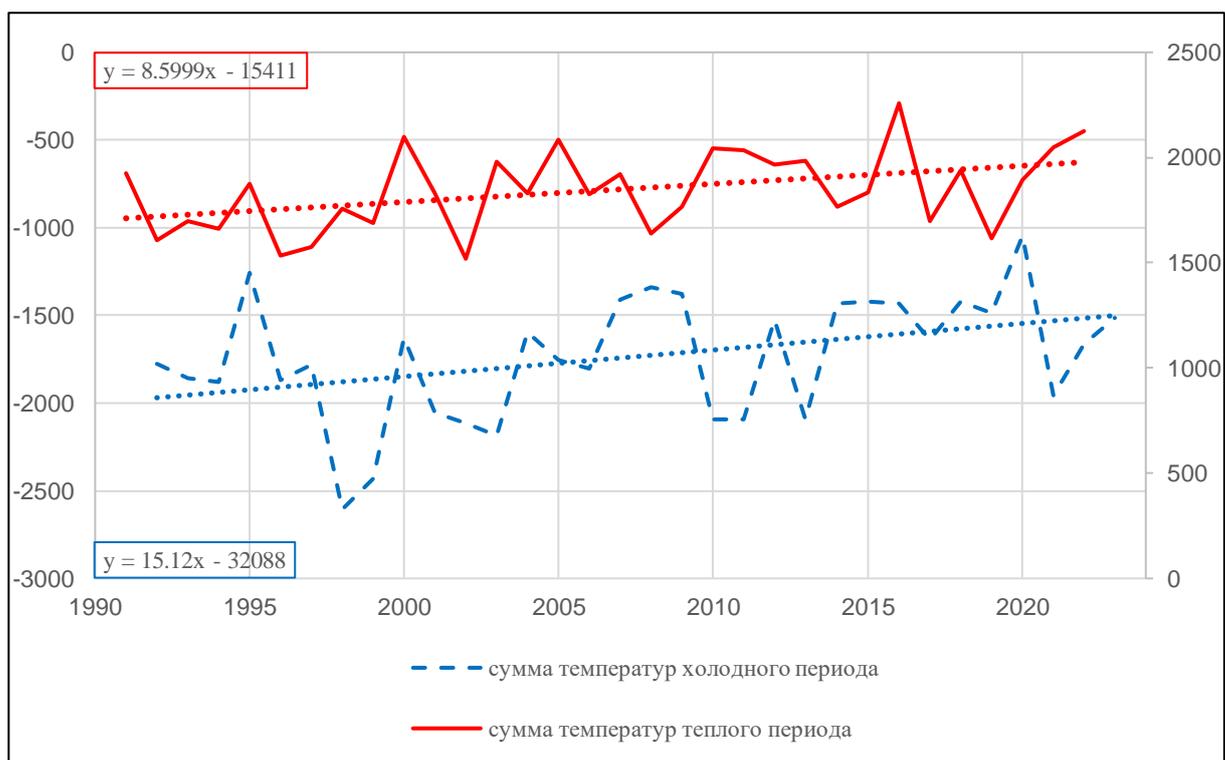


Рисунок 2.2.3 – Линейная аппроксимация трендом сумм температур за теплый и холодный периоды для метеостанции Койнас

Значимость трендов проверялась по критерию Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 5\%$ с помощью надстройки «Анализ данных» в MS Excel:

$$t^* > t_{кр}, \quad (2.2.2)$$

где t^* – фактическое значение t-критерия; $t_{кр}$ – критическое значение t-критерия.

Построение карт пространственного распределения интегральных показателей температуры, а также визуализация их изменений за изучаемый период проводились с помощью картографического пакета для моделирования и анализа данных Surfer.

Верификация полученных результатов происходила по данным отклонений ($^{\circ}\text{C}$) от среднемноголетней температуры воздуха для всех изучаемых метеостанций, полученных с помощью модельного реанализа глобального климата и погоды ERA5.

2.3 Результаты исследования

В таблице 2.3.1 представлены среднемноголетние интегральные показатели температуры воздуха для всех метеостанций за период 1991 – 2023 гг., а на рисунках 2.3.1 и 2.3.2 карты их пространственного распределения (порядковый номер дня с начала календарного года устойчивого перехода температуры через 0°С весной (А) и осенью (Г), продолжительность теплого (Б) и холодного (Д) периодов, сумма температур теплого (В) и холодного (Е) периодов).

Таблица 2.3.1 – Среднемноголетние интегральные показатели температуры воздуха за период 1991 – 2023 гг.

Название метеостанции	Номер дня с начала года устойчивого перехода весной	Число дней теплого периода	Номер дня с начала года устойчивого перехода осенью	Число дней холодного периода	Сумма температур теплого периода	Сумма температур холодного периода
Индига	132	165	298	200	1248	-1775
Мезень	108	193	301	173	1716	-1512
Архангельск	100	207	306	159	2008	-1272
Койнас	104	192	296	174	1853	-1735
Сура	100	199	300	166	1996	-1536
Котлас	94	212	306	153	2253	-1302
Нарьян-Мар	128	162	290	203	1394	-2183
Усть-Цильма	109	182	291	184	1694	-1933
Ираель	108	180	289	185	1717	-2003
Усть-Вымь	98	201	298	165	2075	-1556
Вендинга	102	197	299	168	2007	-1469
Кепино	108	190	298	175	1756	-1362
Кослан	112	178	290	188	1635	-1738
Мосеево	109	186	296	179	1736	-1558
Несь	119	179	298	187	1517	-1425

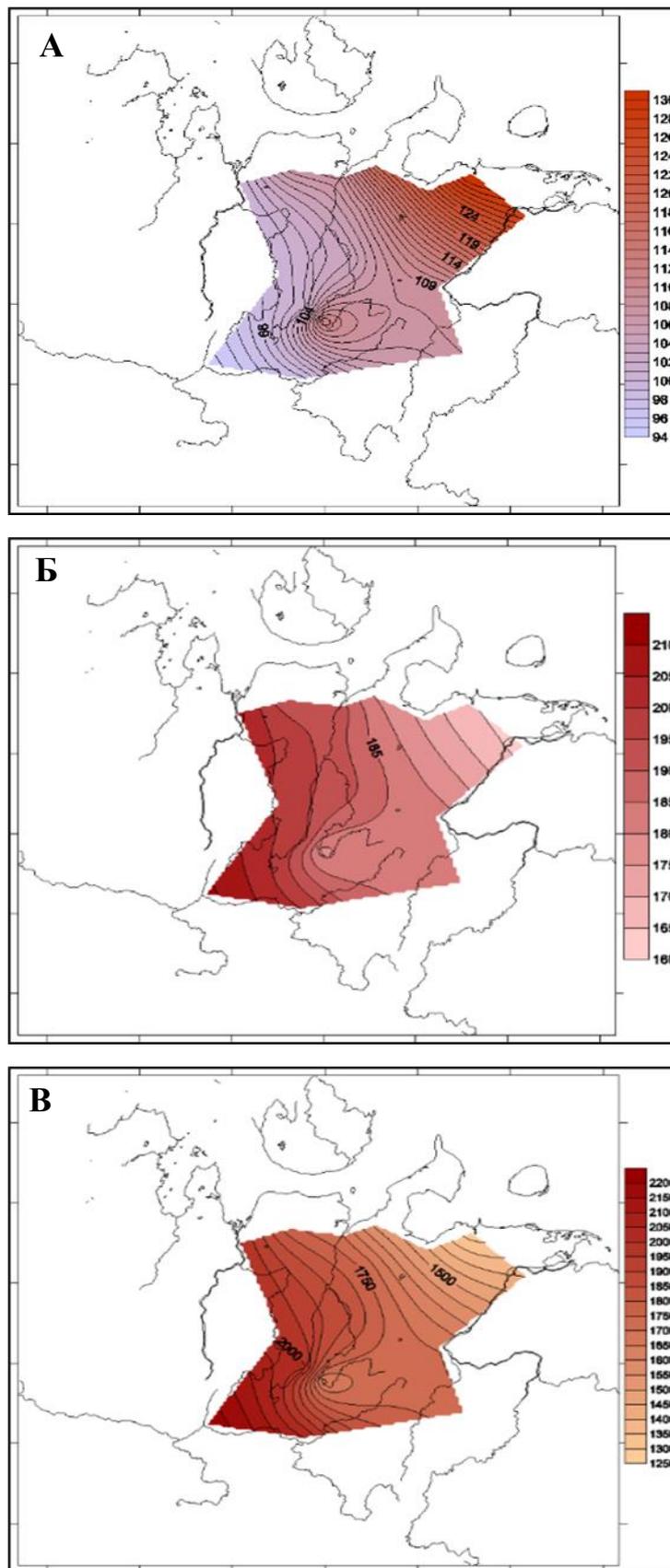


Рисунок 2.3.1 – Карты пространственного распределения интегральных температурных показателей для теплого периода за 1991 – 2023 гг.

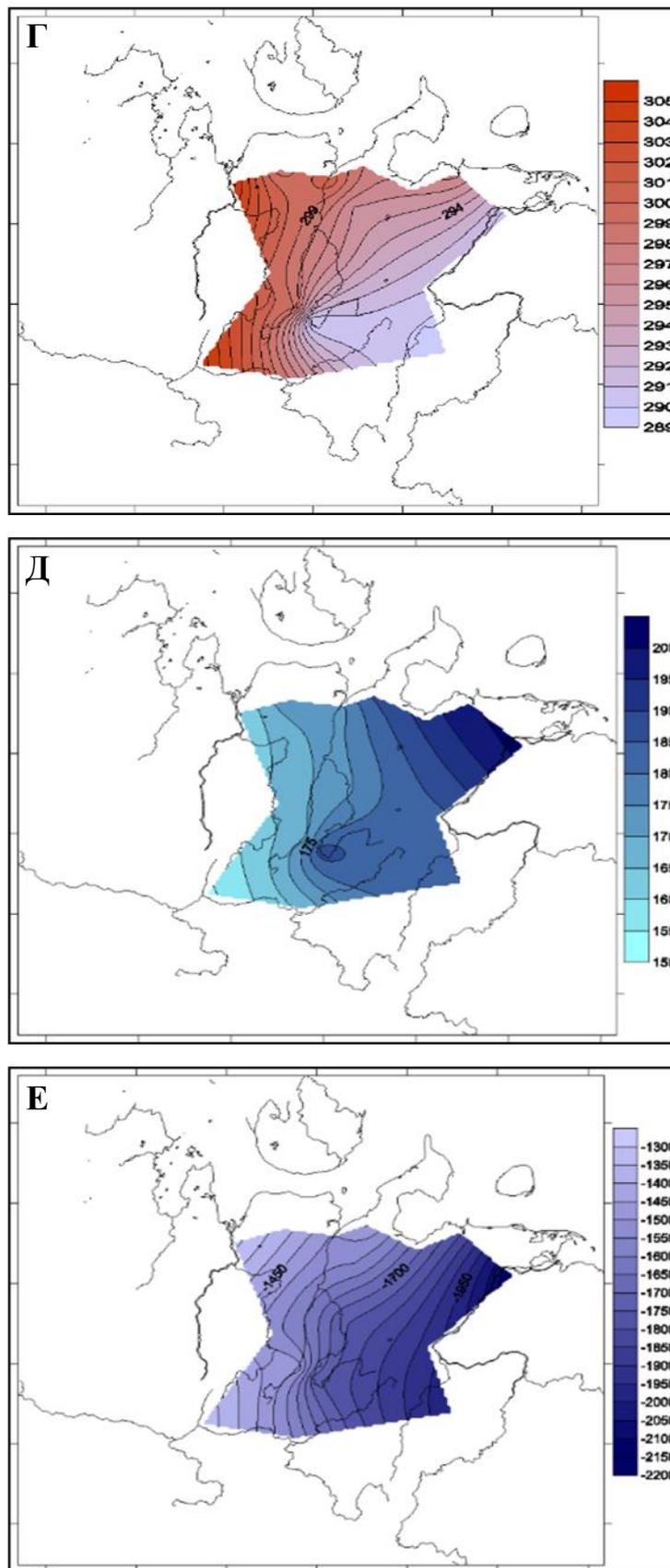


Рисунок 2.3.2 – Карты пространственного распределения интегральных температурных показателей для холодного периода за 1991 – 2023 гг.

Анализ пространственного распределения интегральных температурных характеристик за период 1991 – 2023 гг., полученный на основе ежедневных измеренных данных температуры воздуха с 15 метеостанций, приведенных до среднемноголетних значений, выявил:

1. Дата весеннего перехода через 0°C изменяется от 94 до 132 дней от начала года. Восточная часть изучаемой территории характеризуется более ранним началом наступления теплого периода, в то время как в пределах речного русла наблюдается сильная неоднородность распределения тепла. Особенно выделяется участок в районе села Кослан ($63^{\circ}27'$ ш., $48^{\circ}53'$ в. д.), у которого переход происходит значительно позже других. Дата перехода осенью через 0°C варьируется в интервале 289 – 305 дней от начала года. Переход начинается с западной части водосбора, а замерзание реки при этом происходит с юга на север.

2. Число дней продолжительности теплого периода изменяется от 160 до 220, при этом их увеличение происходит с запада на восток. Число дней продолжительности холодного периода варьируется от 150 до 210, возрастая с востока на запад. Верхняя часть водосбора (особенно возле с. Кослан) характеризуется максимальными значениями.

3. Значения сумм отрицательных температур варьируются от минус 1250°C до минус 2200°C , а положительных – от 1250°C до 2250°C , что подчеркивает пространственную неоднородность температурного режима территории. Особого внимания заслуживает аномалия в районе села Кослан, где, возможно, наличие болот оказывает дополнительное охлаждающее влияние, создавая условия микроклимата [Dmitry G. Chechin, 2024].

Каждый из интегральных показателей был аппроксимирован линейным трендом за период 1991 – 2023 гг., а значимость трендов проверялась по критерию Стьюдента (2.2.2). Значимые тренды наблюдались для числа дней продолжительности теплого периода (9 из 15 станций), для числа дней холодного – 8 из 15 станций, а также по всем метеостанциям для сумм отрицательных и положительных температур (Приложение Б). Далее по уравнениям вида (2.2.1)

были рассчитаны интегральные показатели для начального (1991 г.) и конечного (2023 г.) периодов выборки, а их численная разница закартирована для визуализации изменчивости. На рисунках 2.3.3 и 2.3.4 показаны карты пространственного распределения разницы интегральных показателей температуры за 1991 и 2023 гг. (порядковый номер дня с начала календарного года устойчивого перехода температуры через 0°C весной (А) и осенью (Г), продолжительность теплого (Б) и холодного (Д) периодов, сумма температур теплого (В) и холодного (Е) периодов).

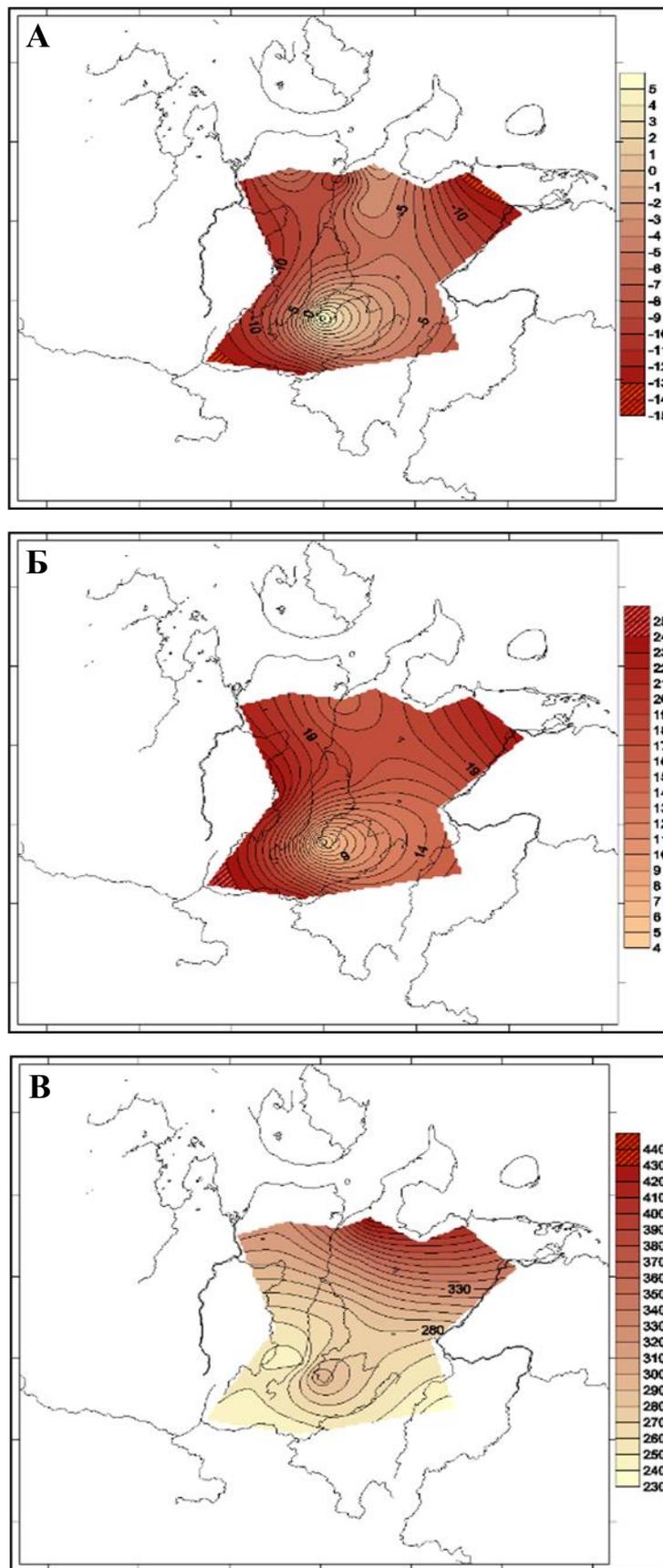


Рисунок 2.3.3 – Карты пространственного распределения разницы интегральных показателей температуры для теплого периода за 1991 и 2023 гг.

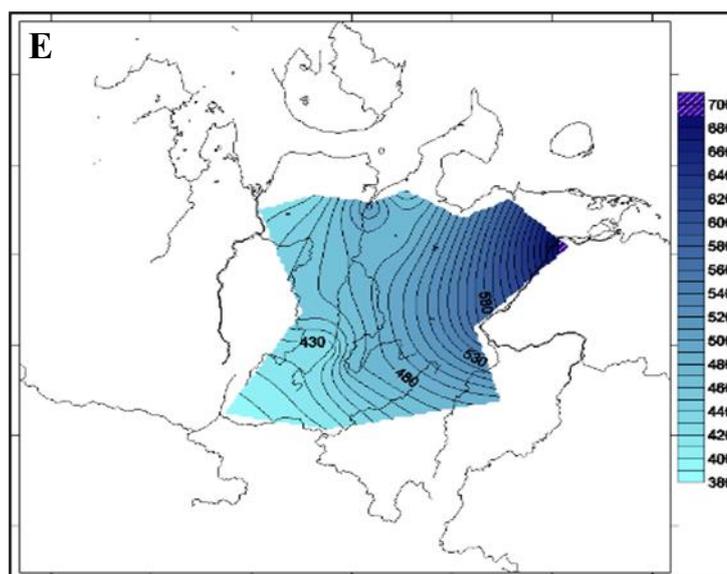
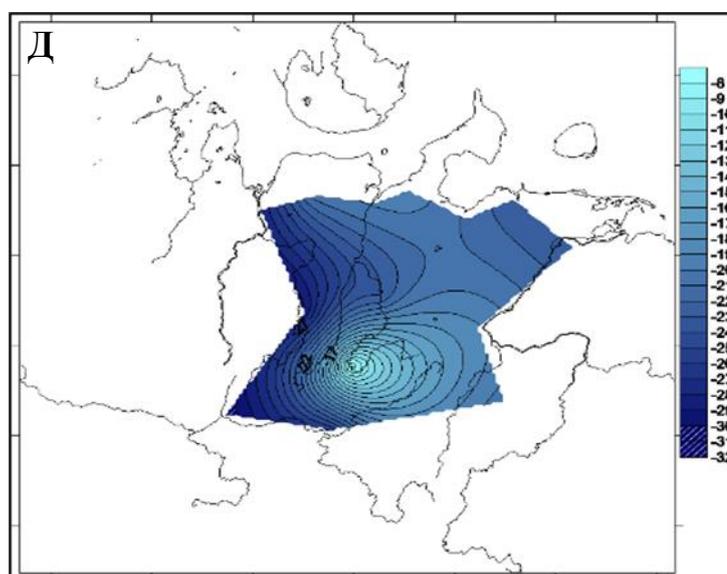
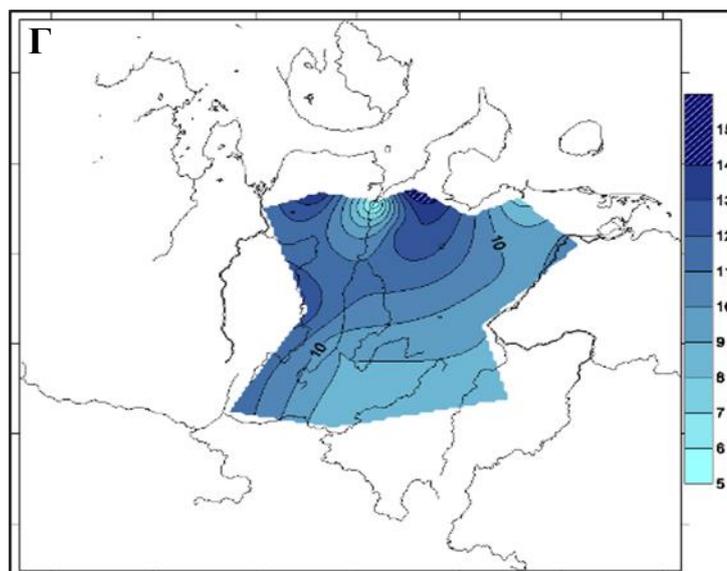


Рисунок 2.3.4 – Карты пространственного распределения разницы интегральных показателей температуры для хол. периода за 1991 и 2023 гг.

Анализ полученных карт выявил смещение устойчивого перехода осенью в среднем на 11 дней позднее (наиболее выраженный эффект у северных станций). Весенний переход в среднем происходит на 8 дней раньше (в частности, на станциях Индига, Мезень, Архангельск, Котлас, Нарьян-Мар и Усть-Вымь). Число дней продолжительности холодного периода сократилось в среднем на 22 дня, а теплый период увеличился в среднем на 18 дней. Суммарные изменения температур происходят в сторону увеличения положительных значений и уменьшения отрицательных, при этом наибольшие изменения наблюдаются на метеостанциях Несь и Индига.

Данные особенности температурного режима изучаемой территории связаны с влиянием континентальности климата, орографических факторов и неоднородного распределения холода и тепла по изучаемой территории.

Для верификации полученных результатов проводилась оценка отклонений ($^{\circ}\text{C}$) от среднемноголетних значений температуры по данным модельного реанализа глобального климата и погоды ERA5 [ECMWF/50]. По данным ERA5 были построены линейные тренды для каждой метеостанции, и произведена оценка величины коэффициента a уравнений вида (2.2.1), что позволило выявить самые сильные отклонения для северных станций, а наименьшие – для с. Кослан (Табл. 2.3.2). Данные результаты совпадают с результатами, полученными на основе наземных измерений.

Таблица 2.3.2 – Результаты верификации по данным реанализа ERA5

Метеостанция	a
Кослан	0.0539
Котлас	0.0551
Кепино	0.0558
Усть-Вымь	0.0559
Сура	0.0561
Вендига	0.0564
Архангельск	0.0565
Койнас	0.0602

Мезень	0.0612
Мосеево	0.0626
Несь	0.0647
Ираель	0.0654
Усть-Цильма	0.0707
Индига	0.0834
Нарьян-Мар	0.0865

2.4 Выводы 2 главы

Оценка изменений интегральных температурных показателей с применением картирования в программе Surfer и результаты верификации по данным ERA5 [ECMWF/50] демонстрируют явное влияние изменений климата на арктические и субарктические регионы. Сдвиги в датах устойчивых температурных переходов через 0°C, изменение в продолжительности теплого и холодного периодов, а также уменьшение сумм отрицательных температур воздуха под их влиянием свидетельствуют о системных климатических изменениях, обусловленных континентальностью климата, орографическими особенностями местности и локальными факторами. Также результаты исследования подтверждают, что изменения климата проявляются сильнее в северных районах, а значит, требуют более детального мониторинга и анализа гидрологических наблюдений.

3 Математическое моделирование ледовой обстановки в бассейне реки Мезень

Водосборный бассейн и русло реки Мезень характеризуются значительной неоднородностью природных условий за счет того, что охватывают несколько климатических зон и разнообразные ландшафты. Это приводит к существенным различиям процессов формирования ледового покрова на разных участках реки.

На начальном этапе исследования не было обнаружено статистически значимых линейных связей между толщиной льда и различными гидрометеорологическими параметрами, за исключением отрицательных температур воздуха. Иными словами, в рамках простых линейных моделей трудно учесть влияние всех факторов на ледовый покров, кроме температурного режима. А использование сложных моделей с нелинейными взаимосвязями требует большого объема исходных данных и значительных вычислительных ресурсов. Практикой инженерных расчетов установлено, что наиболее существенное влияние на нарастание ледового покрова оказывают интегральные показатели температуры воздуха за зимний период. Это обусловлено отдачей тепла с поверхности льда в атмосферу. В связи с этим целесообразно использовать эмпирические уравнения, связывающие толщину льда с суммой отрицательных температур и учитывающие внешние воздействия остальных факторов через поправочные коэффициенты.

В данном разделе представлены результаты моделирования ледовой обстановки реки Мезень с использованием методов многомерного статистического анализа и эмпирических зависимостей. Основным инструментом послужил метод кластерного анализа, который позволил преодолеть проблему неоднородности условий ледообразования на различных участках русла. Далее для каждой выделенной зоны были произведены моделирование и долгосрочный прогноз толщины льда по эмпирическим

уравнениям, основанным на решении задачи Стефана. Также была исследована акватория Мезенского залива.

В ходе работы проанализированы достоинства и недостатки эмпирических формул, а также границы применимости такого подхода в вопросе моделирования толщины льда для акваторий с неоднородными природными условиями.

3.1 Математический аппарат

3.1.1 Кластерный анализ

Кластерный анализ (КА) – автоматизированный метод классификации признаков «без учителя», относящийся к быстро развивающимся направлениям многомерного статистического анализа. Задача кластеризации заключается в разбиении множества объектов (явлений, процессов) на ряд подмножества (кластеры). Признаки, отнесенные к одному и тому же кластеру, должны быть максимально «подобны» между собой и отличаться от признаков других групп. Целью преобразования данных является сжатие и группировка исходной информации об объектах с минимизацией потерь и искажений, что означает переход из первичного многомерного пространства признаков во вторичное пространство меньшей размерности. [Вайновский П.А., Малинин В.Н., 1992]

Существует большое количество алгоритмов кластеризации, которые можно разделить на два основных вида: неиерархические (вероятностные и эвристические) и иерархические (агломеративные и дивизивные). Для оценки схожести объектов вводится понятие меры близости (например, евклидово расстояние).

Метод k-средних (неиерархический) является наиболее распространенным итеративным алгоритмом распознавания образов в гидрологической практике. Основан на минимизации внутриклассового расстояния объектов от их среднего значения (центроида). Стоит отметить, что разбиение множества признаков

векторного пространства должно происходить при условии заранее известного количества кластеров. При этом на каждой новой итерации осуществляется перерасчет центра масс для каждой группы. Алгоритм завершается, когда на каком-то шаге не происходит изменения меры расстояния.

В качестве оценки расстояния между исходными данными принимается квадрат евклидового расстояния, имеющего следующее представление:

$$d_{p,q} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{ip} - Y_{iq})^2}, \quad (3.1.1.1)$$

где p, q – координаты точек в пространстве; X_{ip}, Y_{iq} – вектор признаков.

Также для данных с разной размерностью следует проводить предварительную стандартизацию по формуле:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma_j}, \quad (3.1.1.2)$$

где z_{ij} – нормированная величина некоторого признака; x_{ij} – исходное значение случайной переменной; \bar{x}_j – среднее значение случайной выборки; σ_j – среднеквадратическое отклонение признака.

Основными достоинствами метода k-средних являются:

- незначительные вычислительные затраты;
- независимость от порядка последовательности записей в исходной выборке;
- прозрачность и эффективность алгоритма.

Недостаток метода заключается в его сильной чувствительности к выбросам (экстремальные значения исходных данных), способных исказить

правильное определение центроидов признаков между разбиваемыми кластерами.

На рисунке 3.1.1.1 показана схема преобразования данных с помощью кластерного анализа с использованием метода k-средних.

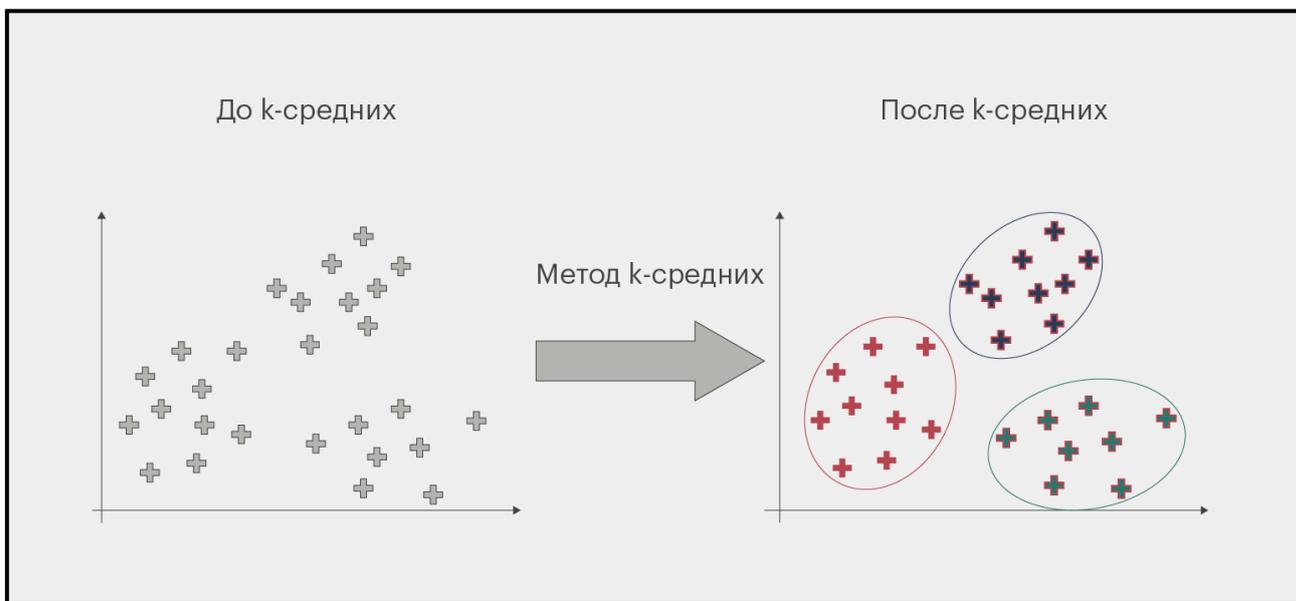


Рисунок 3.1.1.1 – Схема преобразования данных с помощью кластерного анализа с использованием метода k-средних

3.1.2 Эмпирические уравнения, основанные на решении задачи Стефана

Задача Стефана – особый вид краевой задачи для дифференциального уравнения в частных производных, описывающая изменение фазового состояния вещества. Ее характерной особенностью является наличие границ раздела между фазами, не задающихся в явном виде и смещающихся во времени. В научной литературе задачу Стефана также называют задачей с подвижными (свободными) границами или задачей о фазовом переходе [Задача_Стефана].

Впервые формулировка задачи была предложена австрийским физиком Иосифом Стефаном в 1889 г. при исследовании толщины арктического льда. Ученый заметил, что при наложении постоянного перепада температур воздуха на поверхность льда толщина тающего слоя растет пропорционально корню из

времени [Stefan's equation for sea ice thickness]. Он вывел эмпирическую формулу, позже обобщенную в виде краевой задачи теплопроводности. Решение полученного дифференциального уравнения привело к формуле вида:

$$hd(t) = 2\lambda\sqrt{kt}, \quad (3.1.2.1)$$

где k – тепловая диффузия льда, $\text{м}^2/\text{с}$; λ – безразмерный коэффициент, зависящий от перепада температур воздуха; t – время образования льда.

Хотя оригинальная формулировка Стефана имеет четкое физическое обоснование, практические расчеты ледообразования почти всегда упрощены и носят эмпирический характер. Основные упрощения могут заключаться в допущении:

- Одномерности процесса. Считается, что толщина льда возрастает равномерно по вертикали. Горизонтальные температурные градиенты и неоднородности в его толще, связанные с потоком подледной воды, не учитываются.
- Наличия постоянной температуры на нижней границе. Температура воды на границе лед-вода принимается близкой к 0°C , хотя в реальных условиях наблюдаются ее колебания из-за влияния подводных течений и притока тепла из глубин.
- Отсутствия снегового покрова на поверхности льда. В базовой модели игнорируется влияние снега, который значительно меняет теплоизоляционные свойства ледового покрова. В практических расчетах снеговое воздействие обычно рассматривается через поправочные коэффициенты или вводится в виде отдельной расчетной схемы.
- Стационарности метеоусловий. Обычно рассматривается устойчивый перепад температур между воздухом и водой без учета динамики атмосферных процессов.
- Однородности льда по физическим свойствам.

В результате подобных допущений классическое решение задачи Стефана сводится к зависимости толщины льда от «градусо-дней мороза», т.е. интегральной суммы отрицательных среднесуточных температур воздуха за определенный временной интервал с использованием поправочных коэффициентов.

Преимущества эмпирического подхода, основанного на зависимости толщины льда и суммы отрицательных температур воздуха:

- Физическая обоснованность зависимости на основе закона теплообмена, а не просто наличие корреляции между параметрами.
- Простота и малый объем исходных данных.
- Учет основных факторов в интегральной форме, а дополнительных – через поправочные коэффициенты.
- Адаптивность и возможность уточнения, поскольку калибровка поправочных коэффициентов производится по фактическим данным измеренной толщины льда.

К недостаткам можно отнести:

- Ограниченность учета сложных динамических и структурных процессов;
- Неприспособленность модели к изменению внешних воздействий на объект исследования без повторной проверки поправочных коэффициентов, поскольку эмпирический подход «привязан» к статистике прошлых значений.
- Отсутствие прямого учета вероятностных характеристик в эмпирических формулах, поскольку сама по себе зависимость толщины льда от суммы отрицательных температур воздуха не дает информации о дисперсии процесса.

Эмпирические формулы на базе задачи Стефана благодаря своей простоте и достаточной точности получили широкое распространение в инженерной и научной практике. Они встречаются в нормативных документах (например,

[ERDC-CRREL] для Канады) и учебной литературе (например, [Георгиевский Ю.М., Шаночкин С.В., 2007]) разных стран.

В работе [Германов И.В., 2014] представлен долгосрочный прогноз толщины ледового покрова рек севера ЕТР с использованием метеорологических данных по эмпирической формуле, основанной на решении задачи Стефана, имеющей вид:

$$hd = a(AFDD)^{0,5}, \quad (3.1.2.2)$$

где $AFDD$ – сумма отрицательных температур воздуха за расчетный период времени, °С; a - эмпирический коэффициент, определяемый по фактическим данным и отражающий в среднем те условия, которые имели место в период наблюдений (температура воды, высота и плотность снегового покрова, глубина водотока и скорость подледного течения воды).

Автор указал, что формализованный диапазон изменения параметра a для рек с площадью водосбора менее 100 000 км² принимается от 0,8 до 1,3. Для рек с площадью более 100 000 км² его значение составляет от 1,4 до 1,9.

В исследовании были задействованы данные с 62 гидропостов Северного территориального управления по гидрометеорологии. В результате расчетов Германов получил среднюю относительную погрешность порядка 8 – 15 %, что соответствует допустимой величине ошибки (20%).

В монографии «Природная среда и ледовые нагрузки (на примере Обской губы)», авторами которой являются Горгуца Р.Ю. (генеральный директор ООО «Морстройтехнология», кандидат технических наук) и Миронов М.Е. (главный специалист гидротехнического отдела, доктор технических наук) [<https://morproekt.ru/>], представлена методика расчета толщины льда на основе метеорологических данных при ситуации, когда прямых многолетних наблюдений в районе проектирования недостаточно. Авторы использовали статистическую обработку результатов термодинамического моделирования процессов ледообразования с использованием данных морского реанализа за

период не менее 10 лет с учетом результатов верификации по доступным данным натурных измерений толщины льда. Поскольку модель основана на решении уравнения на базе задачи Стефана, в нее были введены эмпирические коэффициенты для адаптации к локальным климатическим и гидрологическим условиям морских акваторий.

В соответствии с методикой расчеты выполняются в следующем порядке:

1. С ближайшей к объекту проектирования метеостанции собираются данные измеренной среднесуточной температуры воздуха за многолетний период;

2. Для каждого зимнего периода выборки рассчитывается индекс замерзания CD , представляющий собой сумму отрицательных температур с начала устойчивых холодов:

$$CD = FD - K_{FT}TD, \quad (3.1.2.3)$$

где FD – индекс отрицательных температур, °С; TD – индекс положительных температур, °С; K_{FT} – коэффициент, учитывающий влияние оттепели на толщину льда.

Для определения индексов отрицательных и положительных температур используются формулы вида:

$$FD = \sum_{D_S}^{D_E} (T_0 - T_{AF}), \quad (3.1.2.4)$$

$$TD = \sum_{D_S}^{D_E} (T_{AT} - T_0^*), \quad (3.1.2.5)$$

где T_0 и T_0^* – температуры замерзания воды и таяния льда соответственно, °С; T_{AF} и T_{AT} – среднесуточные температуры воздуха ниже точки замерзания воды и выше точки таяния льда, °С; D_S и D_E – даты устойчивого перехода температуры через 0°С осенью и весной.

3. По полученным значениям CD рассчитывается толщина льда:

$$hd = a\sqrt{0,9CD - b}, \quad (3.1.2.6)$$

где a – коэффициент, отражающий эффективность превращения накопленных градусо-дней мороза в прирост толщины льда; b – коэффициент, учитывающий начальные затраты тепла на охлаждение воды до точки замерзания.

4. Числовые значения коэффициентов K_{FT} , a и b определяются путем подбора с помощью специально разработанной программы на основе электронных таблиц. Калибровка параметров происходит по доступным данным фактических толщин льда.

Рассмотренная в монографии методика математического моделирования ледового режима была апробирована на конференции «Судоостроение в Арктике: строительство и ремонт флота, кадры и компетенции» и высоко оценена организаторами за ценный вклад в решение проектных задач при освоении Арктики.

Таким образом, использование эмпирических уравнений на основе решения задачи Стефана может эффективно применяться для различных целей, требующих учета толщины ледового покрова.

3.2 Моделирование ледовой обстановки русловой части реки Мезень

В данном разделе представлен анализ ледовой обстановки русловой части реки Мезень. На первом этапе методом кластерного анализа выделены несколько характерных участков реки однородных по условиям формирования ледового покрова. Для каждого участка выполнен расчет и прогноз толщины льда с использованием двух эмпирических формул на основе решения задачи Стефана. Полученные результаты оценены с помощью относительной и абсолютной

ошибки, а их наглядное сравнение представлено в виде диаграмм. Также в итоге исследования была получена схематическая карта диапазона изменения среднесезонной толщины ледового покрова для трех однородных по условиям ледообразования районов реки Мезень.

3.2.1 Результаты кластерного анализа

Для районирования объекта исследования использовался метод k-средних, рассмотренный в пункте 3.1.1.

В качестве исходных данных были выбраны следующие гидрометеорологические параметры [АИС ГМВО]:

1. Ежедневные уровни воды (мБС);
2. Высота снежного покрова на поверхности льда с дискретностью измерений 5 – 10 дней в зимний период (см);
3. Толщина льда с дискретностью измерений 5 – 10 дней в зимний период (см);
4. Ежедневная сумма отрицательных температур воздуха (°С).

Данные измерений получены с 10 пунктов гидрологических наблюдений и на репрезентативных для них метеостанциях государственной наблюдательной сети за период 2009 – 2022 гг. (Рис. 3.2.1.1, Табл 3.2.1.1).



Рисунок 3.2.1.1 – Схема расположения пунктов гидрологических наблюдений

Таблица 3.2.1.1 – Список пунктов гидрологических и метеорологических наблюдений

Гидропост	Код	Координаты	Метеостанция	Код	Координаты
р. Мезень - д.Макариб	70378	63.63; 49.46	Кослан	22695	63.45; 48.92
р. Большая Лоптюга - д.Буткан	70390	63.35; 49.15	Кослан	22695	63.45; 48.92
р. Мезень - д.Разгорт	70381	63.46; 48.71	Кослан	22695	63.45; 48.92
р. Мезень - с.Большая Пысса	70382	64.16; 48.83	Койнас	22583	64.75; 47.65
р.Мезень - с.Койнас	70384	64.75; 47.65	Койнас	22583	64.75; 47.65
р.Едома – л/у Оськино	70393	64.91; 45.95	Койнас	22583	64.75; 47.65
р. Вашка - д.Вендинга	70394	63.45; 47.91	Вендинга	22686	63.45; 47.92
р. Вашка - с.Важгорт	70395	64.02; 47.03	Вендинга	22686	63.45; 47.92
р.Мезень - д.Малонисогорская	70844	65; 45.61	Мосеево	22481	65.77; 46.2
р.Мезень - с.Дорогорское	70847	65.58; 44.51	Мезень	22471	65.87; 44.22

Все исходные параметры были преобразованы в среднегодовые значения для каждого пункта наблюдений и стандартизированы по формуле 3.1.1.2. В таблице 3.2.1.2 представлены результаты стандартизации исходных данных.

Таблица 3.2.1.2 – Стандартизированный вид исходных параметров

	x	y	Снег, см	Лед, см	$\Sigma(-T)$, °C	H, мБС
р. Вашка – с.Важгорт	-0.27	-0.27	-0.87	-0.69	1.34	-0.22
р.Мезень – д.Малонисогорская	0.98	-1.12	0.27	-0.08	0.22	-1.19
р.Мезень – с.Дорогорское	1.72	-1.78	-0.08	0.12	1.29	-1.66
р. Мезень – д.Макариб	-0.77	1.18	0.18	0.39	-0.72	1.29
р. Большая Лоптюга – д.Буткан	-1.12	1.00	-1.07	-0.19	-0.34	1.13
р. Мезень – д.Разгорт	-0.98	0.74	0.79	0.76	-0.78	0.93
р. Мезень – с.Большая Пысса	-0.09	0.81	0.19	1.86	-0.98	0.40
р.Мезень – с.Койнас	0.66	0.10	-1.28	-1.42	0.04	-0.37
р.Едома – л/у Оськино	0.87	-0.92	2.15	-1.37	-1.32	-0.70
р. Вашка – д.Вендинга	-1.00	0.26	-0.28	0.61	1.24	0.39
Среднее	64.2	47.4	21.4	45.1	-897	61.1
СКО	0.78	1.67	2.04	2.11	60.8	33.5

Последующий расчет КА проводился в программном обеспечении STATISTICA 10. Разбивка осуществлялась на заранее определенное число кластеров (3 кластера). На рисунке 3.2.1.2 показан график распределения центроидов, а в таблице 3.2.1.3 приведены результаты обратного преобразования гидрометеорологических характеристик в исходные размерности для трех кластеров по всем признакам.

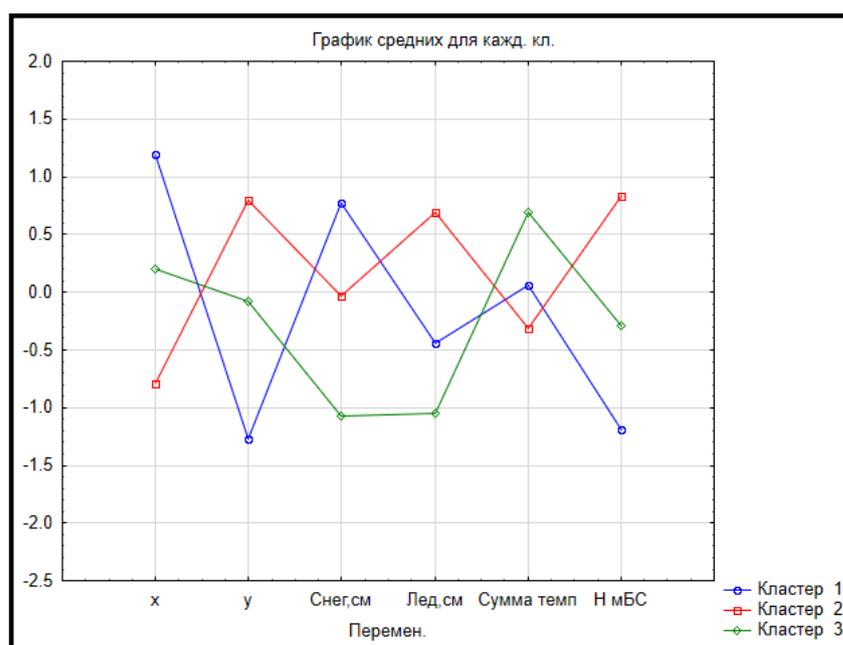


Рисунок 3.2.1.2 – График средних значений кластеров

Таблица 3.2.1.3 – Итоговые средние значения гидрометеорологических характеристик по всем пунктам наблюдений

№ кластера	Гидропост	x	y	Снег,см	Лед,см	$\Sigma(-T)$, °С	Н мБС
3	р. Вашка - с.Важгорт	64.39	47.34	19.28	42.88	-855.60	51.19
1	р.Мезень - д.Малонисогорская	65.16	45.36	23.06	44.17	-893.67	21.25
1	р.Мезень - с.Дорогорское	65.16	45.36	23.06	44.17	-893.67	21.25
2	р. Мезень - д.Макариб	63.61	48.81	21.39	46.55	-916.64	88.97
2	р. Большая Лоптюга - д.Буткан	63.61	48.81	21.39	46.55	-916.64	88.97
2	р. Мезень - д.Разгорт	63.61	48.81	21.39	46.55	-916.64	88.97
2	р. Мезень - с.Большая Пысса	63.61	48.81	21.39	46.55	-916.64	88.97
3	р.Мезень - с.Койнас	64.39	47.34	19.28	42.88	-855.60	51.19
1	р.Едома - лесхимучасток Оськино	65.16	45.36	23.06	44.17	-893.67	21.25
2	р. Вашка - д.Вендинга	63.61	48.81	21.39	46.55	-916.64	88.97

Полученные кластеры интерпретированы следующим образом:

- Кластер №1 представляет собой приустьевой участок реки, на котором наблюдаются наибольшая высота снега, умеренная толщина льда и сумма отрицательных температур, а также наименьший уровень воды за многолетний период.
- Кластер №2 охватывает верхнюю часть русла и поворот реки (возле с. Кослан), включая в себя территориально близкий гидропост с притока (р. Вашка). Выделенный участок имеет среднюю высоту снега, наибольший уровень воды, сумму отрицательных температур и толщину ледового покрова за многолетний период.
- Кластер №3 формализован в средней части русла. Данный район имеет наименьшие значения высоты снежного покрова и толщины льда, а также средние уровни воды.

3.2.2 Моделирование и прогноз толщины льда

После районирования русла создавались зависимости толщины льда от суммы отрицательных температур воздуха для каждого пункта гидрологических наблюдений (10 гидропостов). Цель заключалась в получении динамики значений толщин льда за многолетний период для выделенных кластеров. Для этого был выбран вид уравнения 3.1.2.2, рассмотренный в разделе 3.1.2.

Выбранное уравнение согласно работе [Германов И.В., 2014] имеет ограничение числового диапазона коэффициента a , а для показателя степени n он постоянен и равняется 0,5. Для реки Мезень с площадью водосбора 78000 км², согласно методике, значение параметра a следует принимать в диапазоне от 0,8 до 1,3.

Данная эмпирическая формула может не учитывать локальные особенности водосборов, морфологии русел и гидродинамики потока отдельно взятых рек, поскольку зависимость создана на обобщенном материале большого количества водных объектов северной части ЕТР. Кроме того, гидрометеорологическая информация, использованная в уравнении, охватывает временной период до 2009 года, поэтому необходим повторный подбор поправочных коэффициентов.

В настоящем исследовании проводился подбор коэффициентов (a и n) для каждого гидропоста реки Мезень без ограничения числового диапазона. Полученные эмпирические зависимости толщины льда от суммы отрицательных температур были названы «степенной зависимостью» и сравнивались с результатами уравнения [Германов И.В., 2014], названным «уравнением Стефана» для упрощения описания результатов.

Оптимизация числовых значений параметров a и n выполнялась с помощью модуля «поиск решения» в MS Excel. Надстройка «поиск решения» работает с группой ячеек, которые называются ячейками переменных и используются при расчете формул в целевых ячейках. Целевая ячейка – оптимальное значение формулы, которое содержится в одной ячейке с учетом

ограничений на значения в других ячейках с формулами на листе. «Поиск решения» производит расчеты таким образом, чтобы значения расчетных и фактических данных были наиболее близкими друг к другу, а сумма отклонений между ними равнялась нулю [Постановка и решение задачи...].

На рисунке 3.2.2.1 и 3.2.2.2 показано сравнение числовых значений коэффициентов a и n для уравнений степенной зависимости и Стефана

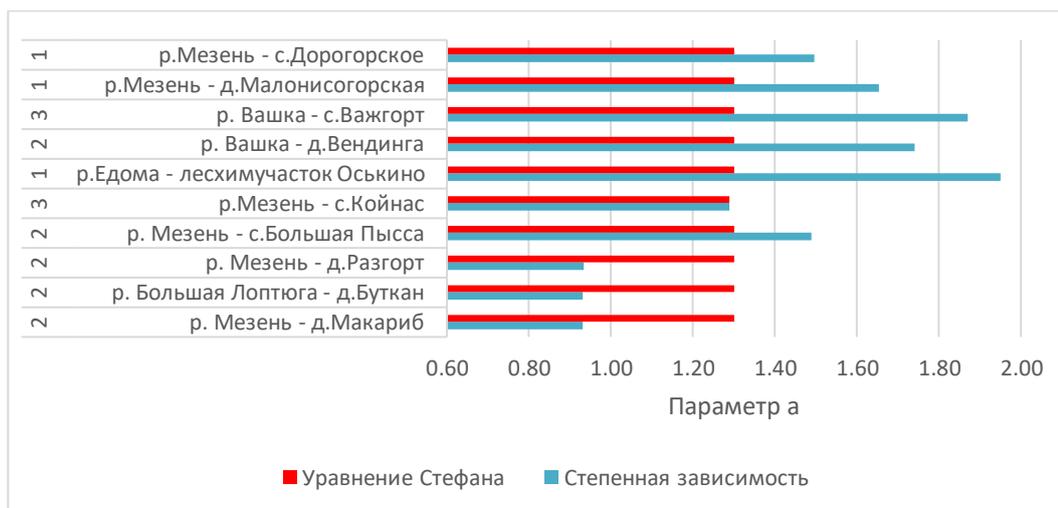


Рисунок 3.2.2.1 – Сравнение числовых значений параметра a уравнений степенной зависимости и Стефана

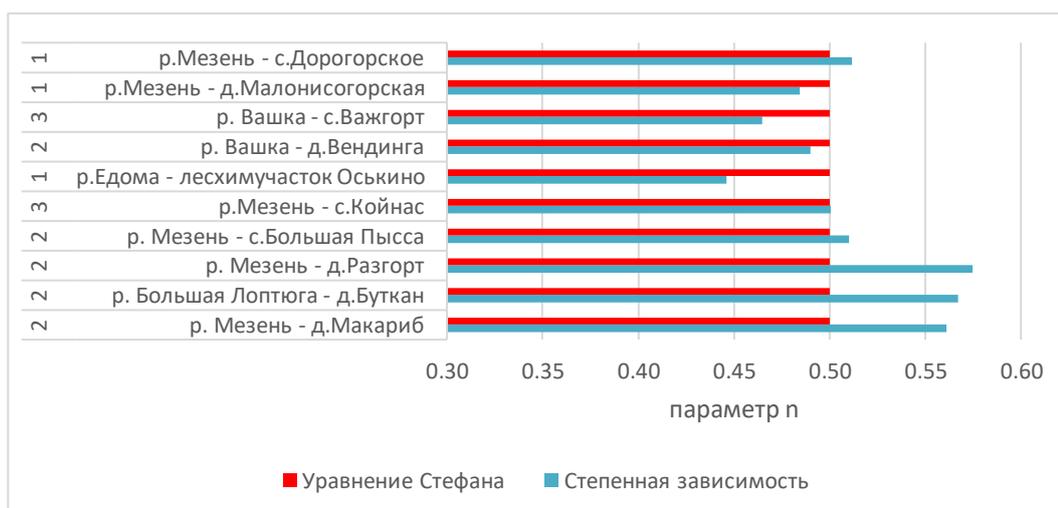


Рисунок 3.2.2.2 – Сравнение числовых значений параметра n уравнений степенной зависимости и Стефана

Для уравнения Стефана практически для всех пунктов гидрологических наблюдений значение коэффициента a равно 1,3.

Для степенной зависимости без установленного числового диапазона коэффициента a наблюдаются значимые изменения его значений. Для нижней части водосбора (участок от с. Дорогорское до д. Малонисогорская) происходит увеличение от 0,2 до 0,35. На притоке (р. Едома) наблюдается максимальное изменение до 0,65. На гидропостах правого притока (р. Вашка) – увеличение от 0,44 до 0,57. В средней части водосбора для поста в с. Койнас изменений не наблюдается. Прирост для пункта наблюдений в с. Большая Пысса составил 0,19. На участке поворота реки (вблизи с. Кослан) коэффициент a уменьшился на 0,37 для все трех гидропостов.

С числовыми значениями параметра степени n происходит обратная ситуация. Небольшое увеличение зафиксировано (0,06 – 0,07) на участке поворота реки. Для гидропостов, идущих вниз по течению, происходит уменьшение коэффициента. В средней части русла нет сильных изменений, а приустьевой участок и ближайшие к нему притоки (р. Вашка и р. Едома) характеризуются небольшим понижением на 0,02 – 0,05.

В таблице 3.2.2.1 представлены результаты прогноза толщины льда по двум видам уравнений для зависимой (2009 – 2020 гг.) и независимой (2021 – 2022 гг.) выборок.

Таблица 3.2.2.1 – Сравнение прогнозных толщин льда по уравнениям степенной зависимости и Стефана на зависимом и независимом материале

Река/Пост	Степенная зависимость				Уравнение Стефана			
	Абс. ошибка, см		Отн. ошибка, %		Абс. ошибка, см		Отн. ошибка, %	
	Завис. р.	Независ .р.	Завис. р.	Независ .р.	Завис. р.	Независ .р.	Завис. р.	Независ .р.
р. Вашка - с.Важгорт	0.4	1.5	10	3	5.4	6.7	14	15
р.Мезень - д.Малонисогорская	3.9	4.2	9	8	7.0	4.4	15	9
р.Мезень - с.Дорогорское	-0.9	-2.7	9	7	8.1	7.2	17	15

р. Мезень - д.Макариб	1.9	0.9	13	3	5.5	4.8	13	10
р. Большая Лоптюга - д.Буткан	0.1	-4.9	12	12	5.2	0.9	16	2
р. Мезень - д.Разгорт	-1.5	-4.2	9	9	6.5	4.5	13	10
р. Мезень - с.Большая Пысса	3.0	-5.3	11	12	8.9	1.2	18	3
р.Мезень - с.Койнас	2.3	1.7	11	17	2.3	1.7	11	17
р.Едома - л/у Оськино	0.8	-1.9	8	5	2.2	-0.7	10	5
р. Вашка - д.Вендинга	-1.6	-5.8	15	13	9.9	6.4	23	14

В целом, абсолютная ошибка по зависимой выборке для обоих уравнений не превышает критического значений 10 см. Для уравнения Стефана свойственно некоторое занижение результатов прогноза в среднем на 6 см, наибольшие ошибки наблюдаются на пунктах гидрологических наблюдений в с. Большая Пысса (8,9 см) и д. Вендинга (9,9 см). Для степенной зависимости среднее значение занижения толщины льда составляет 1,5 см. Наибольшие отклонения аппроксимации отмечаются в пункте д. Малонисогорская (3,9 см) и с. Большая Пысса (3,0 см). На некоторых гидропостах (с. Дорогорское, д. Разгорт, д. Вендинга), наоборот, происходит завышение значений в среднем на 1,3 см. Касательно независимого материала, степенная зависимость имеет среднюю ошибку 4,1 см. Наибольшие отклонения наблюдаются в д. Вендинга (5,3 см) и с. Большая Пысса (5,8 см). Для уравнения Стефана средняя ошибка аппроксимации составляет 4,2 см, наибольшие погрешности наблюдаются на гидропостах с. Дорогорское (7,2 см) и с. Важгорт (6,7 см).

На рисунках 3.2.2.3 и 3.2.2.4 представлены диаграммы распределения абсолютной ошибки по зависимому и независимому ряду для всех пунктов наблюдений.



Рисунок 3.2.2.3 – Диаграмма распределения абсолютной ошибки по зависимому ряду



Рисунок 3.2.2.4 – Диаграмма распределения абсолютной ошибки по независимому ряду

Также практически для всех пунктов наблюдений относительная ошибка по двум уравнениям находится в доверительном интервале 20%.

Средняя относительная погрешность степенной зависимости на зависимой выборке составляет 10,6%, а на независимой уменьшается до 8,9%. Зависимость имеет наибольшую точность для гидропоста с. Дорогорское (з. – 9%; нз. –7%) и л/у Оськино (з. – 8%; нз. – 5%).

При использовании уравнения Стефана среднее отклонение от прогнозных значений равняется 14,9% на зависимой и 9,9% на независимой выборках.

Наименьшие относительные погрешности наблюдаются для пунктов наблюдений л/у Оськино (з. – 10%; нз. – 5%) и д. Макариб (з. – 13%; нз. – 10%).

На рисунках 3.2.2.5 и 3.2.2.6 представлены диаграмма распределения относительной ошибки по зависимому и независимому ряду для всех пунктов наблюдений.

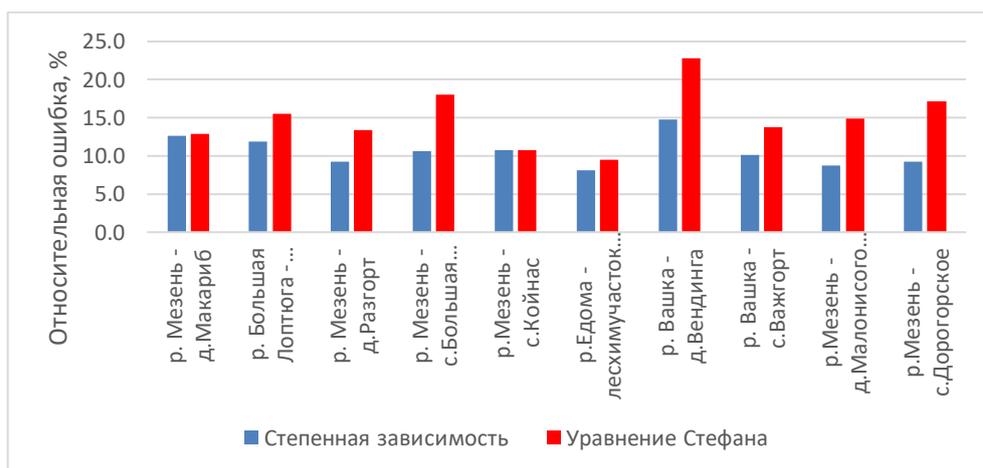


Рисунок 3.2.2.5 – Диаграмма распределения относительной ошибки по зависимому ряду

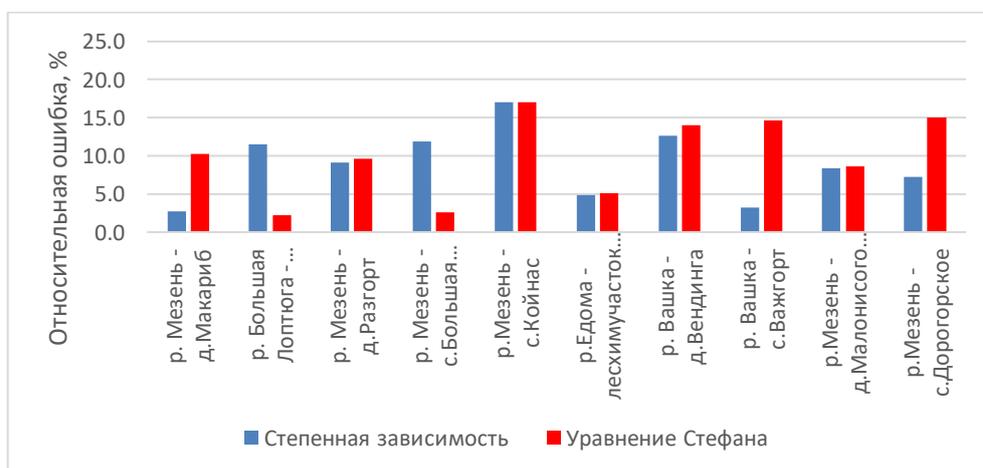


Рисунок 3.2.2.6 – Диаграмма распределения относительной ошибки по независимому ряду

На рисунках 3.2.2.7, 3.2.2.8 и 3.2.2.9 визуализирован ход фактических и прогнозных толщин льда для некоторых пунктов гидрологических наблюдений

за период 2009 – 2022 гг. Результаты по остальным гидропостам представлены в приложении В.

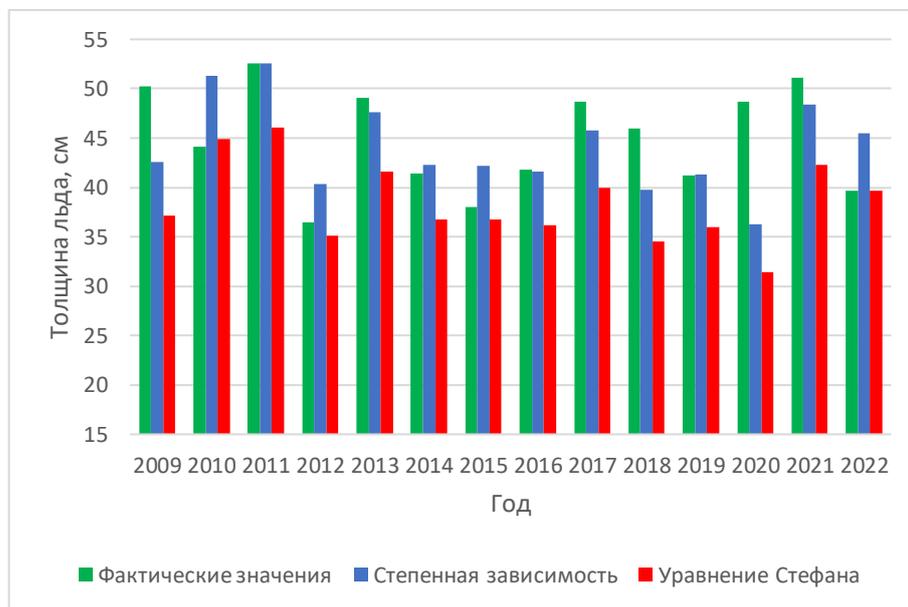


Рисунок 3.2.2.7 – Сравнение фактических и прогнозных толщин льда на гидропосте с. Малонисогорская

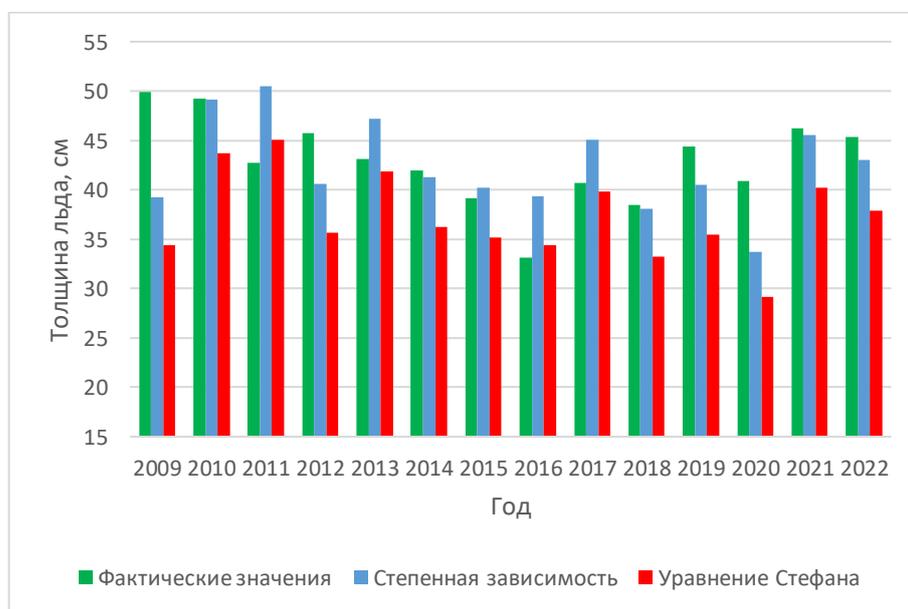


Рисунок 3.2.2.8 – Сравнение фактических и прогнозных толщин льда на гидропосте с. Важгорт

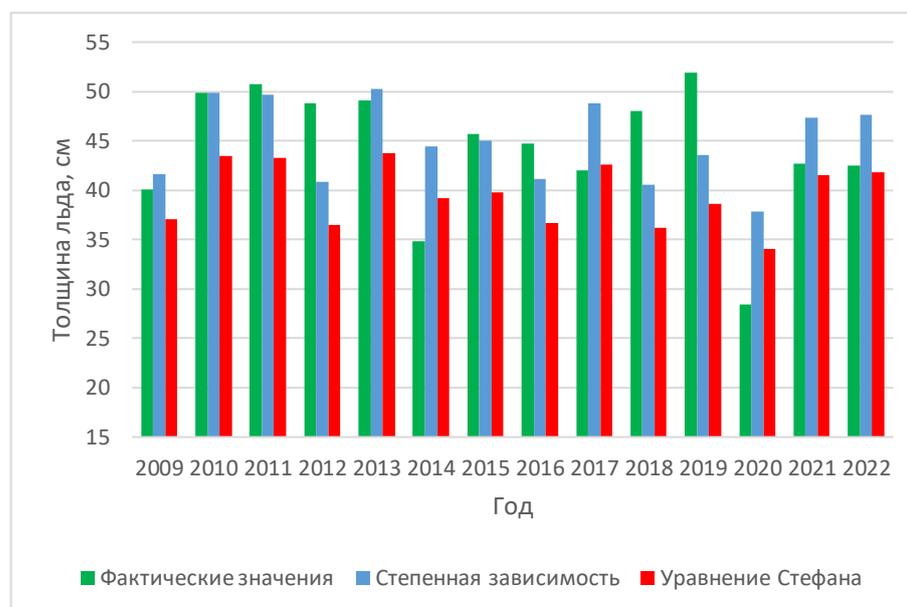


Рисунок 3.2.2.9 – Сравнение фактических и прогнозных толщин льда на гидропосте д. Буткан

По результатам моделирования можно сделать вывод, что оба уравнения демонстрируют способность достаточно точно улавливать среднегодовой ход изменения толщины льда в зависимости от суммы отрицательных температур воздуха. Уравнение Стефана имеет тенденцию к занижению прогнозных значений. Такая особенность делает его применимым для среднего участка русла реки Мезень, где с помощью КА были выявлены наименьшие значения толщин ледового покрова. Моделирование с помощью степенной зависимости, наоборот, склонно к некоторому завышению значений толщины льда, что в конечном итоге показывает наименьшую погрешность расчета. Таким образом, степенная зависимость наиболее подходящей для большинства пунктов гидрологических наблюдений реки Мезень. Однако стоит отметить, что обе аппроксимации не способны прогнозировать экстремальные величины толщины льда. Прежде всего это объясняется упрощенной функциональной формой эмпирических уравнений и сложностью системы взаимодействия между гидрометеорологическими параметрами.

Заключительный этап состоял в оценке диапазона изменения среднемноголетней толщины льда для каждого руслового района однородного

по условиям формирования ледового покрова. Для этого был выполнен переход от среднегодовых величин к многолетним значениям с использованием выведенных степенных зависимостей для каждого пункта гидрологических наблюдений, входящего в определенный район. На рисунке 3.2.2.10 представлена схематическая карта диапазона изменения среднемноголетней толщины ледового покрова для трех однородных по условиям ледообразования районов реки Мезень.

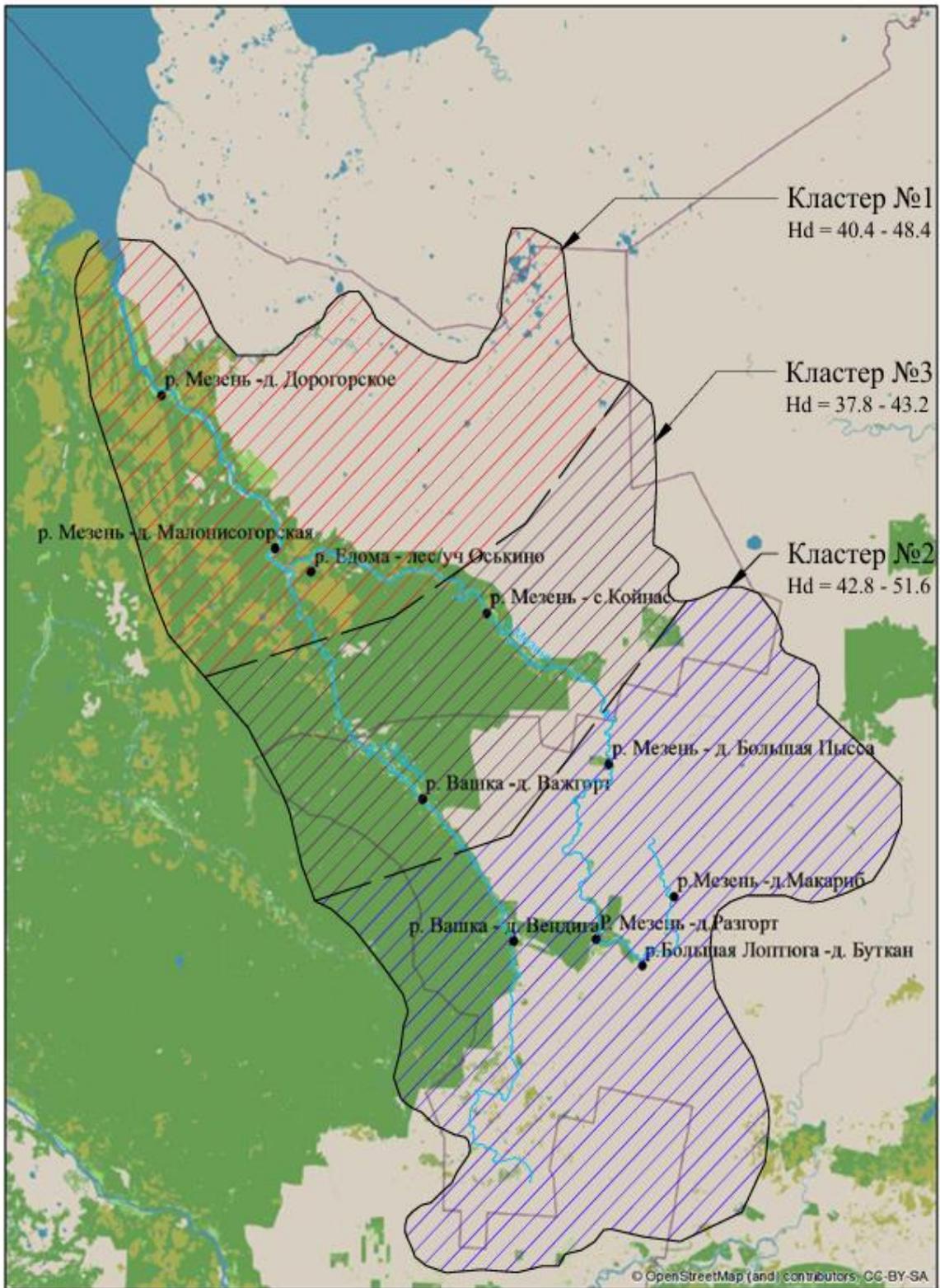


Рисунок 3.2.2.10 – Схематическая карта диапазона изменения среднегогодовой толщины ледового покрова для трех однородных по условиям ледообразования районов реки Мезень

3.3 Моделирование ледовой обстановки Мезенского залива

Акватория Мезенского залива (Мезенская губа Белого моря) отличается комплексом сложных природных условий, которые существенно влияют на формирование и динамику ледового покрова. К основным особенностям относятся: экстремально высокая приливная активность, большие скорости ветра, опресняющее влияние впадающих в залив рек (Кулой и Мезень) и воздействие теплого Северо-Атлантического течения (северо-восточное продолжение Гольфстрима).

Отмечено, что Мезенская губа представляет большой интерес для научных исследований как индикатор климатических изменений в прибрежной арктической зоне. Изменения температуры воздуха и длительности зимы заметно отражаются на сроках и продолжительности ледового периода в заливе. По данным метеостанций, относящихся к региону Белого моря, за последние десятилетия среднегодовая температура воздуха повысилась примерно на $1,5^{\circ}\text{C}$ [Климаты Беломорья]. Помимо климатической изменчивости интерес представляют и сложные гидродинамические процессы, протекающие в акватории.

Также акватория Мезенского залива давно рассматривается как перспективный регион для гидроэнергетического строительства. Еще в советское время здесь планировалось возведение мощной приливной электростанции. Проект Мезенской ПЭС (расчетной мощностью около 8 ГВт) обоснован большой величиной приливов. Строительство станции было начато в 1980-х годах, но приостановлено с распадом СССР. К проекту возвращались в 2000-е годы, хотя в настоящее время он остается не реализованным [Мезенская ПЭС]. Кроме того, залив является важным транспортным путем региона. Через него осуществляется морское сообщение порта Мезень с другими портами Белого и Баренцева морей (порты Архангельск и Нарьян-Мар). Порт Мезень расположен в приустьевом участке реки, в 40 км выше входа в залив. Это небольшой порт, имеющий несколько причалов (один в городе Мезень и два в

поселке Каменка) и работающий сезонно (навигация примерно с мая по октябрь). Исторически порт Мезень был единственным способом, связывающим район с внешним миром во время летней навигации. Основной функцией порта остается обеспечение доставки жизненно необходимых грузов для труднодоступных районов Архангельской области. В зимнее время, когда морской путь недоступен, транспортная связь поддерживается лишь авиацией и ледовыми переправами [Морвести].

С учетом сказанного, в разделе 3.3 уделено внимание моделированию толщины льда в Мезенском заливе как одному из ключевых параметров ледовой обстановки, определяющему безопасность и эффективность хозяйственной деятельности и представляющему интерес в научном плане.

3.3.1 Результаты моделирования расчетных толщин льда Мезенского залива

В данном разделе представлены результаты моделирования расчетных толщин льда для Мезенского залива Белого моря в соответствии с методикой [Горгуца Р.Ю., Миронов М.Е., 2025], рассмотренной в пункте 3.1.2.

В связи с отсутствием в свободном доступе данных измеренных толщин льда на прибрежных станциях государственной наблюдательной сети в акватории Мезенского залива для верификации результатов моделирования использовались данные морского реанализа, принятые в исследовании за фактические.

Для этого был выбран сеточный архив [ARCTIC_MULTIYEAR_PHY_002_003] для приземной температуры воздуха и толщины льда, полученный посредством модельного реанализа океана и атмосферы NUCOM.

Данный архив разработан Европейским Союзом в рамках программы «Коперник». Он содержит массивы метеоданных суточной, месячной и годовой дискретности с пространственным разрешением 3×3 км за период с 1991 г. по настоящее время (архив обновляется в реальном времени).

Данные толщин льда с суточным разрешением брались для точки акватории Мезенского залива с координатами 66.592 с.ш; 43.524 в.д. и были преобразованы в среднедекадные значения за период 1991 – 2022 гг. (Рис.3.3.1.1; Табл. 3.3.1.1).

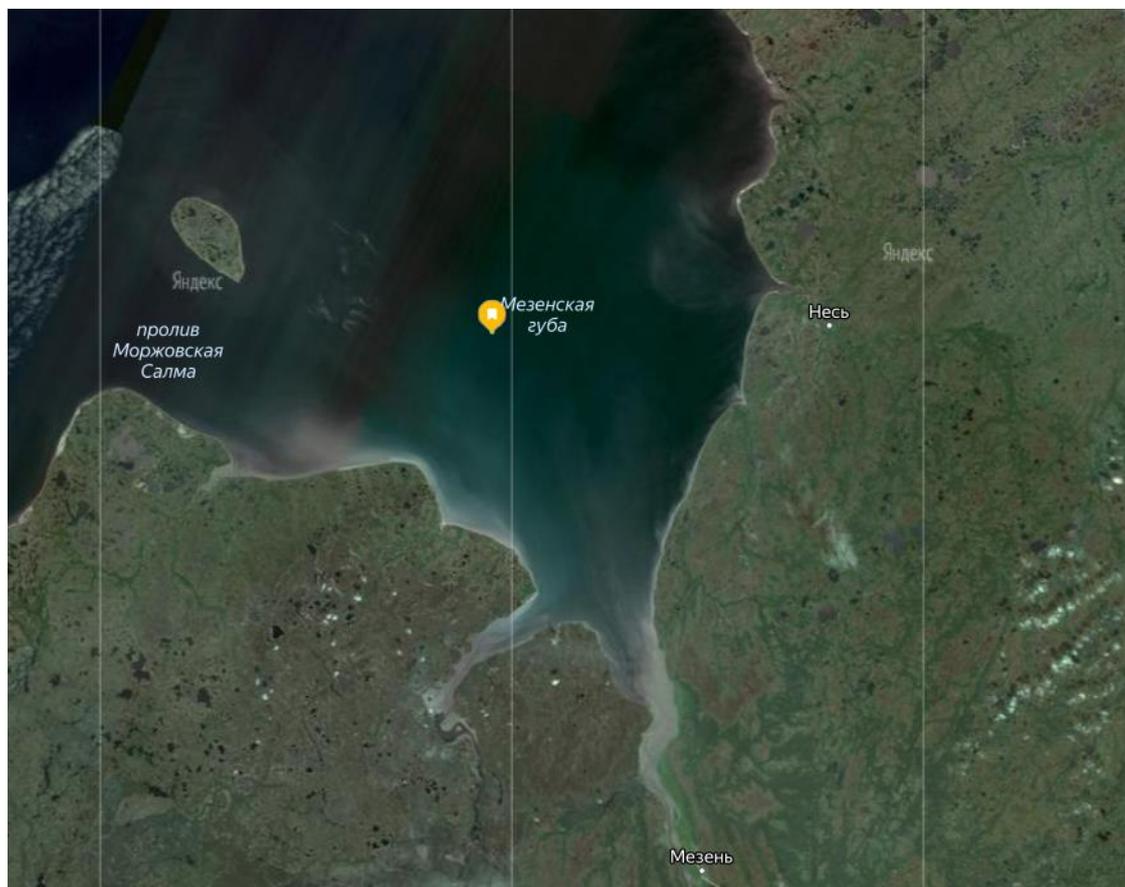


Рисунок 3.3.1.1 – Расположение точки в акватории Мезенского залива

Таблица 3.3.1.1 – Среднедекадные значения фактических толщин льда для акватории Мезенского залива за период 1991 – 2022 гг., м

Месяцы	12			1			2			3			4			5		
Дни	10	20	31	10	20	31	10	20	28	10	20	31	10	20	30	10	20	31
hd,м	0.00	0.01	0.05	0.10	0.13	0.15	0.20	0.23	0.25	0.26	0.26	0.25	0.25	0.22	0.16	0.09	0.02	0.00

Путем подбора с помощью специально разработанной программы на основе электронных таблиц для коэффициентов в формулах 3.1.2.3 – 3.1.2.6 были получены следующие значения:

$$a = 0.01, b = - 30; KFT = 150.$$

Результаты сопоставления расчетных и фактических средних толщин льда по декадам морозного периода представлены на рисунках 3.3.1.2 и 3.3.1.3.

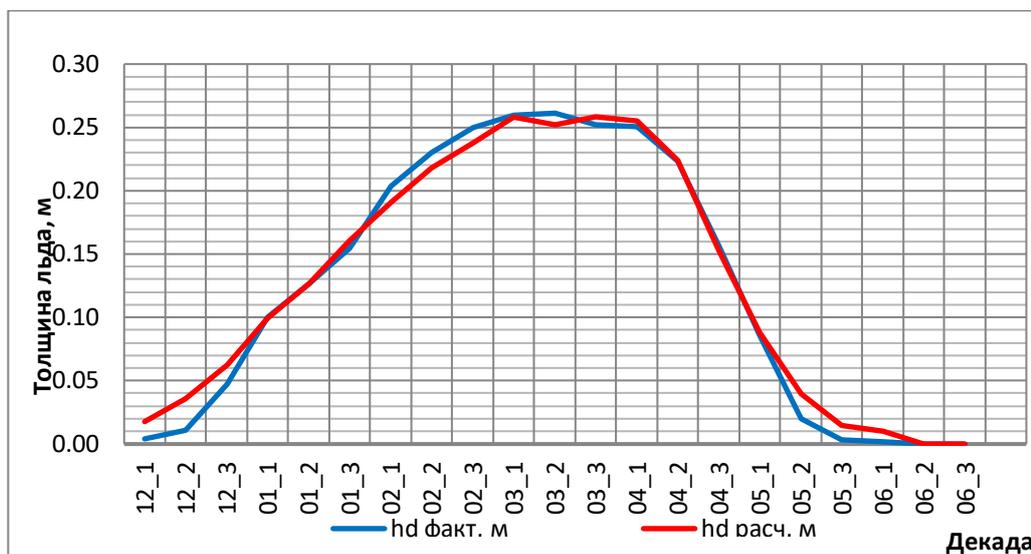


Рисунок 3.3.1.2 – Сравнение фактических и расчетных средних толщин льда по декадам морозного периода

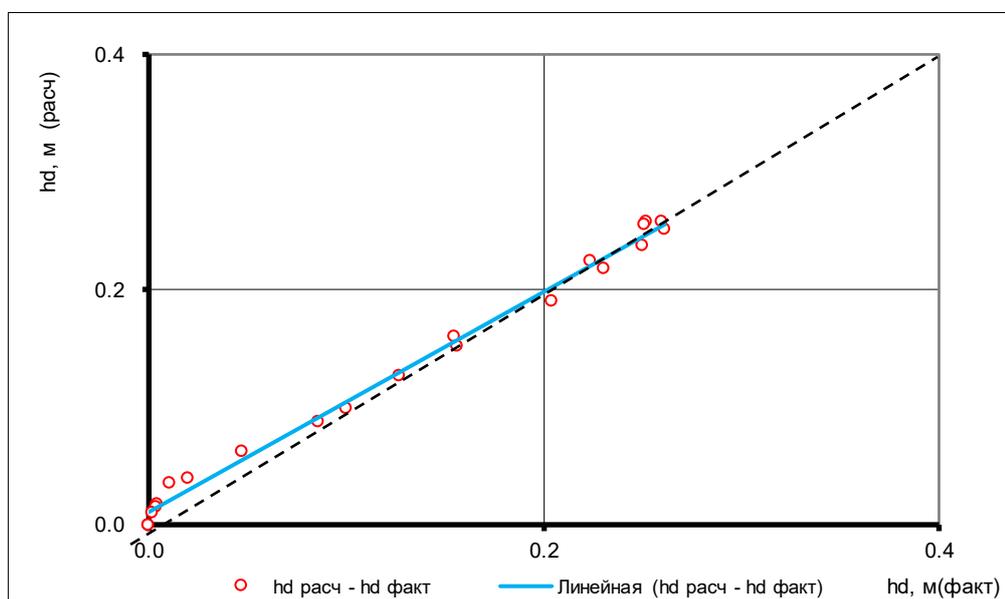


Рисунок 3.3.1.3 – Биplot фактических и рассчитанных среднедекадных толщин льда в точке с координатами 66.592 с.ш; 43.524 в.д. для периода 1991 – 2022 гг.

В таблице 3.3.1.2 приведены некоторые статистические характеристики, в том числе значения индекса предсказательной способности WI [Кантаржи И.Г.,2020], широко применяемого для верификации гидрологических моделей.

Таблица 3.3.1.2 – Статистическая оценка качества расчетных данных в сравнении с фактическими среднедекадными толщинами льда в точке с координатами 66.592 с.ш; 43.524 в.д. для периода 1991 – 2022 гг.

Среднедекадная толщина льда, годы	Среднеквадратическое отклонение, м	Коэффициент корреляции, R	Индекс предсказательной способности, WI
1991 – 2022	0.06	0.97183	0.99996

Полученные результаты на рисунке 3.3.1.2 показывают хорошее соответствие между расчетными и фактическими толщинами льда в точке акватории Мезенского залива с координатами 66.592 с.ш; 43.524 в.д. Также оценка графического сопоставления подтверждается результатами статистического анализа (рис. 3.3.1.3 и табл. 3.3.1.2).

Методика, представленная в работе [Горгуца Р.Ю., Миронов М.Е., 2025] является мощным инструментом в вопросах моделирования ледовых условий. Но стоит иметь в виду, что она не учитывает взаимодействие температуры воды и ледового покрова. Этим объясняется несоответствие вершин графиков распределения фактических и расчетных толщин льда по декадам на рисунке 3.3.1.2, поскольку воды Белого моря подвержены отепляющему влиянию Гольфстрима.

Таким образом, эмпирические формулы на основе задачи Стефана дают эффективные результаты, но требуют учета определенных факторов в зависимости от условий акватории.

3.4 Общие выводы по результатам 3 главы

В результате исследования были получены следующие результаты и выводы:

1. Река Мезень и Мезенский залив (Мезенская губа Белого моря) обладают крайне неоднородными и сложными условиями ледообразования. В ходе работы подробно рассмотрены особенности, присущие каждому из этих объектов. Для реки, в частности, это смена климатических зон с юга на север,

чередование холмистых и равнинных участков местности, наличие крупных излучин (например, поворот у с. Кослан) и притоков, влияющих на сроки и характер ледового покрова. Для залива – экстремальные приливы, сильное ветровое воздействие, заметное влияние притока пресной воды. Все перечисленные специфические условия необходимо учитывать при исследовании ледового режима. Применение единой модели для всей системы и учет только физико-климатических усредненных показателей недостаточны. Комплексный подход на основе кластерного анализа и эмпирических формул на базе задачи Стефана к каждому относительно однородному русловому участку показал лучшие результаты моделирования (абсолютная ошибка не превышает 10 см, а относительная находится в пределах 20%) по сравнению с обобщенной зависимостью из работы [Германов И.В., 2014]. В частности, для трех выделенных районов русла были подобраны разные значения параметров уравнений, отражающие местные условия. В результате была получена схематическая карта диапазона изменения среднемноголетней толщины ледового покрова для трех однородных по условиям ледообразования районов реки Мезень. Использование методики на основе решения задачи Стефана из работы [Горгуца Р.Ю., Миронов М.Е., 2025] для акватории Мезенского залива показала хорошие результаты (коэффициент корреляции и индекс предсказательной способности WI близки к 1), но требует учета температуры воды за счет влияния Северо-Атлантического течения.

2. Влияние современных климатических тенденций вносит существенную роль в процессы формирования ледового режима реки Мезень, что видно по изменению эмпирических коэффициентов в уравнениях. Сравнение результатов, полученных по степенной зависимости толщины льда от сумм отрицательных температур с уравнением Стефана, где учтены данные до 2009 г., показало, что оптимально подбираемые коэффициенты a и n , отражающие климатическое влияние (помимо морфологии) и скорость убывания темпов нарастания льда со временем, изменяются. Для разных участков русла реки коэффициент a демонстрирует тенденцию к снижению или повышению, а

показатель степени n колеблется вокруг значения 0,5. Это свидетельствует о том, что лед набирает толщину крайне неравномерно. Например, для приустьевого участка русла (самое северное положение водосбора) повышение коэффициента a и снижение показателя степени n в уравнении свидетельствуют о том, что нарастание льда сначала протекает интенсивно, но затем замедляется из-за теплового воздействия при сокращении зимнего периода и, возможно, увеличения влажности климата. Иными словами, климатические изменения и связанные с ними особенности отражаются на моделируемых параметрах ледообразования. Показатель n в некоторых случаях снижается, указывая на отклонение реального процесса ледообразования от идеальной квадратной зависимости, вероятно из-за дополнительных источников тепла и влияния течения.

В заключении исследования можно сделать вывод, что результаты моделирования ледовой обстановки реки Мезень и Мезенского залива демонстрируют возможность успешного применения относительно простых эмпирических подходов даже в условиях высокой природной неоднородности. Составление региональных зависимостей толщины льда от сумм отрицательных температур с учетом кластерного деления территории позволяет учесть локальные факторы без усложнения модели. При этом, важно периодически пересматривать параметры модели a и n с учетом новых данных и климатических трендов.

Таким образом, для русловых участков рек полученный подход лучше применять в качестве предварительных оценочных прогнозов ледовой обстановки, т.к. степенная зависимость учитывает лишь нарастание льда. Методика из работы [Горгуца Р.Ю., Миронов М.Е., 2025] является более эффективной, т.к. учитывает динамику толщины льда за целый зимний период.

4 Оценка динамики влияния климатических изменений на ледовый режим реки Мезень

В разделе «Оценка изменений температурного режима водосбора реки Мезень за период 1991 – 2023 гг.» установлено, что возрастающие тенденции приземной температуры воздуха смещают даты наступления холодного периода на более поздний срок и сокращают продолжительность зимнего сезона для всей изучаемой территории. Поэтому в данной главе оценена динамика влияния климатических изменений на ледовый режим реки Мезень, а именно на продолжительность устойчивого ледостава за период 2009 – 2022 гг.

Также произведен анализ ледовой обстановки руслового и устьевого участков в характерные суровые (2009/2010 и 2010 /2011 гг.) и мягкие (2016/2017 и 2019/2020 гг.) зимы. Выбор данных лет согласуется с метеорологическими наблюдениями: суммы отрицательных температур воздуха за зимний сезон в эти годы резко различаются (около минус 1200 – 1240°С в 2010 – 2011 гг. и около минус 600 – 1020°С в 2017 – 2020 гг.).

4.1 Оценка изменения продолжительности устойчивого ледостава на реке Мезень за период 2009 – 2022 гг.

Для количественной оценки динамики ледостава на реке Мезень в период 2009 – 2022 гг. были использованы данные 10 пунктов гидрологических наблюдений. По разности дат начала и окончания устойчивого ледостава вычислялась его продолжительность для каждого гидропоста, после чего рассчитывалось усредненное значение за каждый год по совокупности всех пунктов наблюдений (Табл. 4.1.1).

Таблица 4.1.1 – Средняя продолжительность устойчивого ледостава по данным 10 пунктов гидрологических наблюдений за 2009 – 2022 гг.

Год	Ср. продолжительность ледостава, сут
2009	128
2010	132
2011	126
2012	111
2013	128
2014	121
2015	152
2016	132
2017	127
2018	104
2019	107
2020	118
2021	119
2022	134

Для выявления долгосрочной тенденции изменения продолжительности устойчивого ледостава применялась линейная регрессия по годам наблюдений (Рис. 4.1.1).

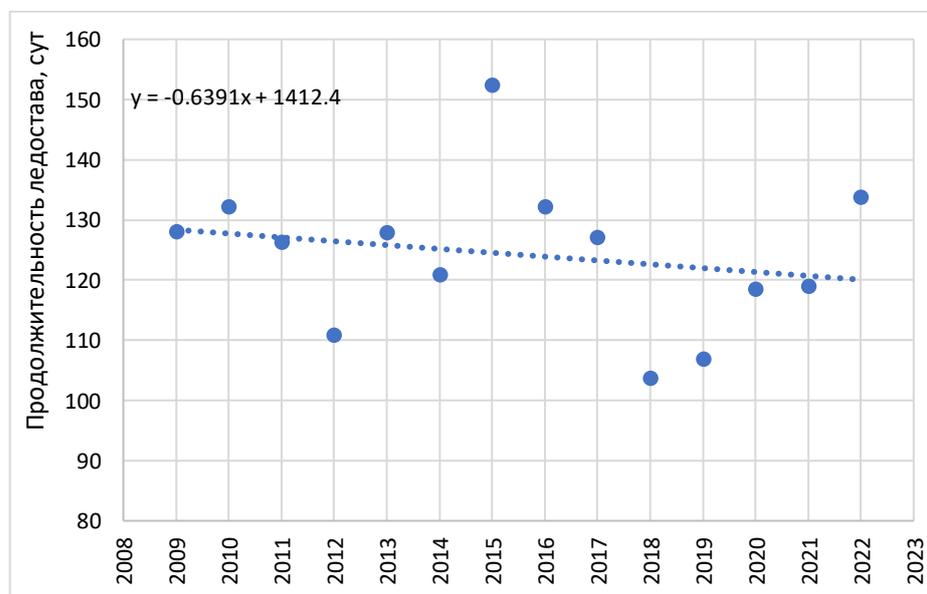


Рисунок 4.1.1 – Аппроксимация линейным трендом продолжительности устойчивого ледостава реки Мезень за период 2009 – 2022 гг.

Аппроксимирующая прямая имеет отрицательный наклон $a = - 0,6391$ сут/год, что указывает на уменьшение периода устойчивого ледового покрова в исследуемом интервале времени. В совокупности средняя продолжительность устойчивого ледостава за 14-летний период сократилась примерно на 8 суток, что свидетельствует о заметном эффекте потепления климата.

4.1.2 Изменчивость ледового режима в характерные суровые и мягкие зимы

В статье [Агафонова С.А. и др., 2021] говорится, что ежегодно зимой в устье реки Мезень формируется «ледяная плотина» – зона сплоченного торосистого льда, существенно влияющая на режим течений и колебания уровня воды во время половодья. Ее положение прежде всего зависит от метеорологических условий зимы и особенностей русла. За период 1983 – 2020 гг. створ «плотины» наблюдался в диапазоне 21 – 30,5 км от устья. В суровые зимы непрерывные отрицательные температуры воздуха влияли на продвижение льда ближе к устьевому створу, и «плотина» образовывалась ниже по течению (ближе к Мезенскому заливу). В мягкие зимы под действием периодических оттепелей происходило ограничение продвижения кромки льда, способствуя его накоплению выше по течению (дальше от Мезенского залива). Также температурное влияние отражалось на сроках формирования ледяной перемычки и ее мощности.

Данное явление сказывается на процессе весеннего речного ледохода. Идущий вниз по течению лед сталкивается с оставшейся зимней «плотиной», вызывая подпор и снижение пропускной способности русла выше преграды. Это способствует задержанию движущихся ледовых масс и формированию вторичных заторов непосредственно над «плотиной». По мере дальнейшего прогрева воздуха происходят эпизодические прорывы ледового материала, которые склонны вновь застревать в местах сужения русла вниз по течению, что обеспечивает механизм рекуррентного формирования весенних заторов вплоть

до полного очищения водного потока ото льда [Beltaos S., 2014] [Lindenschmidt К.-Е., 2024].

Ниже рассматривается, как изменения температурного режима в зимний период влияют на толщину и распределение льда в русловой и устьевой зонах реки Мезень и сказываются на положении ледовых заторов весной.

4.1.3 Распределение толщины льда русловой зоны реки Мезень в суровые и мягкие зимы

С помощью кластерного анализа, рассмотренного в главе 3, для реки были получены однородные районы по условиям формирования ледового покрова для 2009/2010, 2010/2011, 2016/2017 и 2019/2020 зимних сезонов. Данные районы были интерпретированы как нижний (приустьевой), средний и верхний участки русла, что существенно упрощает анализ и интерпретацию результатов. В качестве примера в таблицах 4.1.3.1 – 4.1.3.2 показано распределение гидропостов по кластерам. Можно заметить, что некоторые гидропосты в зависимости от года «перебегают» в разные кластеры (д. Вендинга, л/у Оськино, с. Большая Пысса). Поскольку «беглецами» в основном являются гидропосты, расположенные на притоках (реки Вашка и Едома), это может объясняться особенностями их гидрологического режима, отличающегося от р. Мезени. Участок русла, где расположен гидрологический пункт наблюдений в с. Большая Пысса характеризуется большим количеством излучин, что может влиять на формирование и распределение ледового покрова в разные годы (Рис. 4.1.3.1). Остальные гидропосты сохраняют свою принадлежность к назначенным классам и совпадают с распределением при многолетнем районировании, представленном в главе 3 (выделены жирным шрифтом в таблице).

Таблица 4.1.3.1 – Кластерное распределение гидростов за 2011 г.

Участок русла		
Верхний + поворот реки	Средний	Нижний
р. Мезень - д.Макариб	р. Вашка - с.Важгорт	р.Мезень - д.Малонисогорская
р. Большая Лоптюга - д.Буткан	р.Мезень - с.Койнас	р.Мезень - с.Дорогорское
р. Мезень - д.Разгорт	р. Вашка - д.Вендинга	р.Едома - лесхимучасток Оськино
р. Мезень - с.Большая Пысса		

Таблица 4.1.3.2 - Кластерное распределение гидростов за 2017 г.

Участок русла		
Верхний + поворот реки	Средний	Приустьевой
р. Вашка - д.Вендинга	р. Мезень - с.Большая Пысса	р.Мезень - д.Малонисогорская
р. Вашка - с.Важгорт	р.Мезень - с.Койнас	
р. Мезень - д.Макариб		
р. Большая Лоптюга - д.Буткан	р.Едома - лесхимучасток Оськино	р.Мезень - с.Дорогорское
р. Мезень - д.Разгорт		

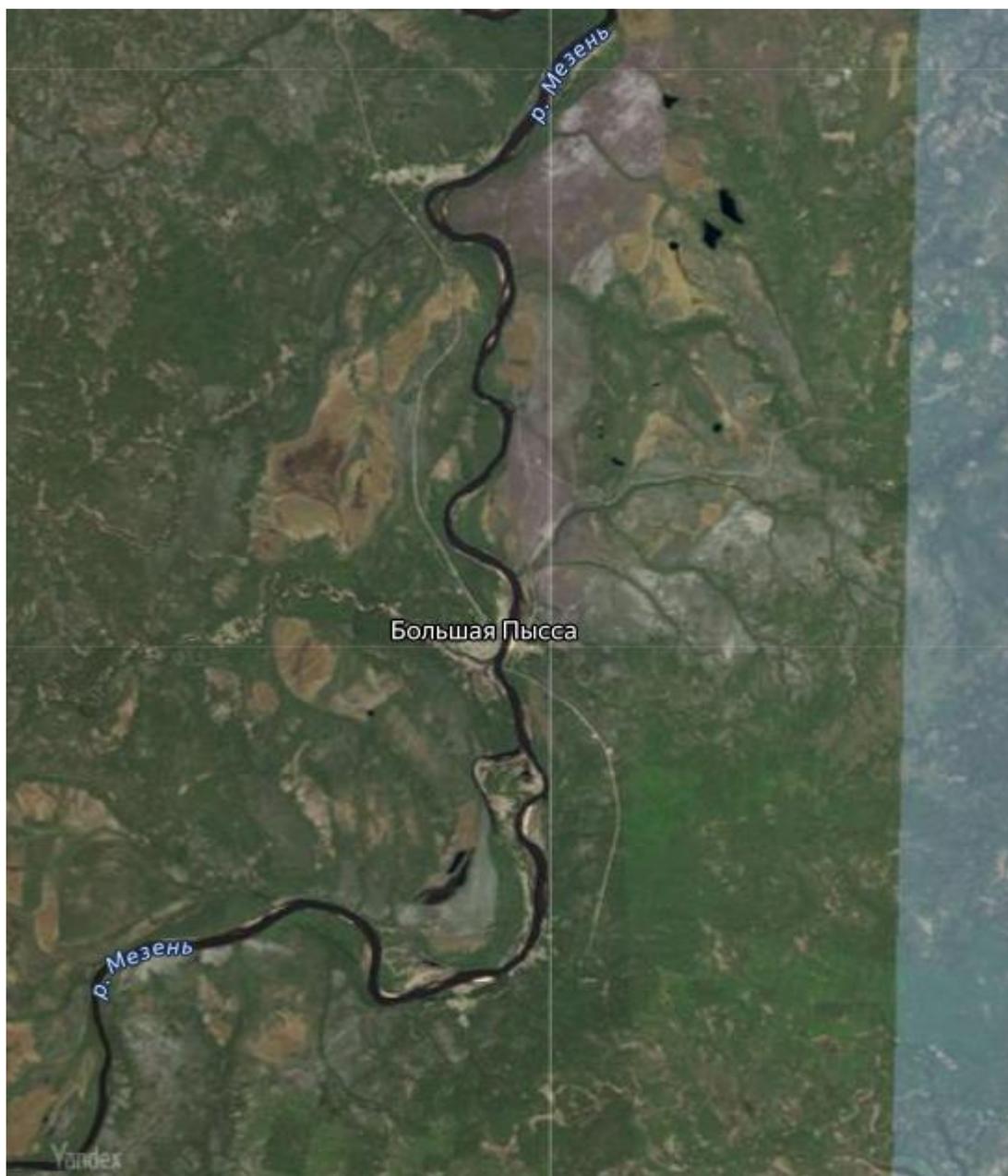


Рисунок 4.1.3.1 – Участок расположения гидрологического пункта наблюдений в с. Большая Пысса

Анализ распределения ледового покрова в выбранные годы показал существенные различия (Рис. 4.1.3.2). Происходит смещение максимальных толщин льда в зависимости от зимних температур – в холодные зимы (2009/2010; 2010/2011 гг.) наибольшие значения наблюдались в приустьевом участке. В теплые зимы (2016/2017; 2019/2020 гг.) максимальные значения толщин льда отмечены в среднем течении и в районе впадения рек Вашка и Едома.

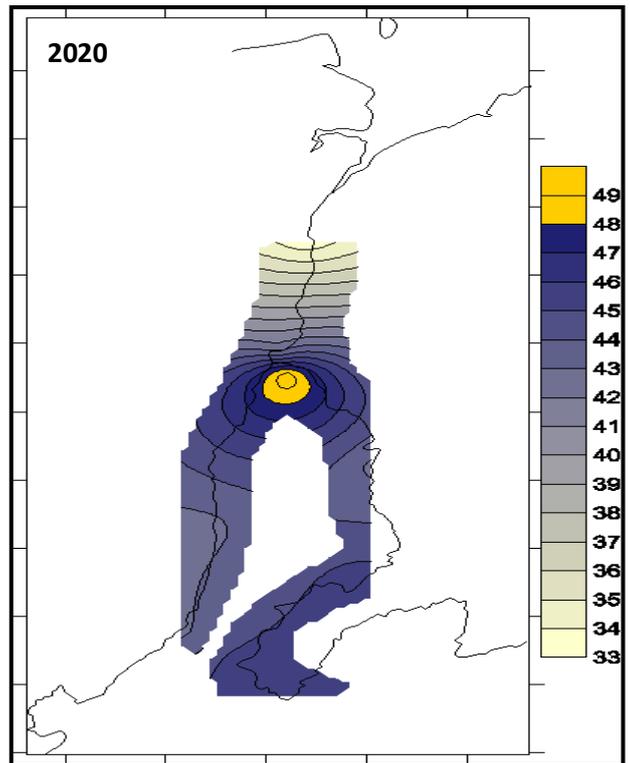
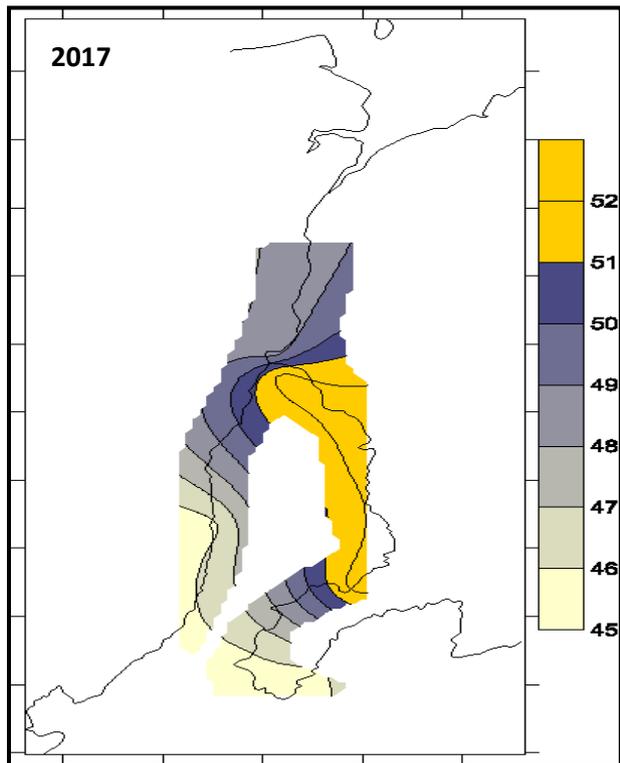
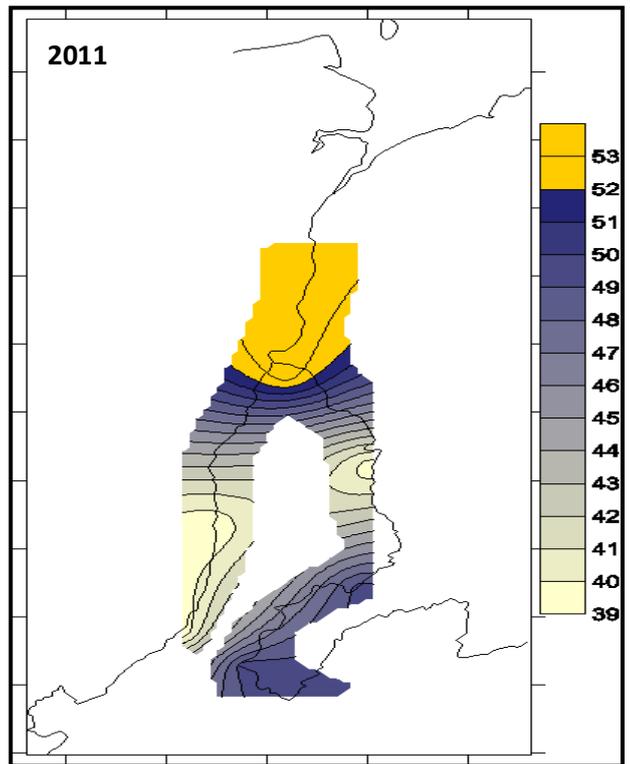
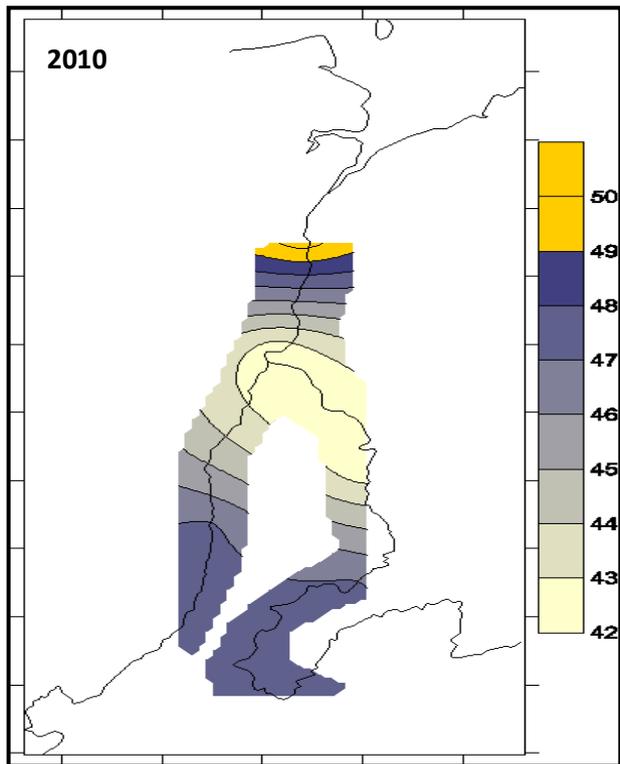


Рисунок 4.1.3.2 – Распределение толщины льда в русле реки Мезень в характерные суровые и мягкие зимы

В суровые зимы длительный период отрицательных температур воздуха способствует раннему и повсеместному становлению ледостава по руслу реки. К началу года (1 января) лед сковывает даже приустьевую часть. Динамические колебания уровня воды при приливах приводят к разломам льда и нарастанию торосов, вследствие чего толщина сложенного льда достигает величины порядка амплитуды прилива. Кроме того, в начале зимы мороз обычно сопровождается относительным дефицитом осадков, поэтому тонкий молодой лед не покрыт толстым слоем снега и нарастает быстрее. В результате в 2010 – 2011 гг. приустьевой участок реки отличался наиболее мощным льдом. Также стоит отметить, что данный участок характеризуется обилием излучин, приводящим к образованию ледяных перемычек из торосов, закрепляющихся в местах сужения русла.

В мягкие зимы при более высокой средней температуре зимнего сезона ледовый покров устанавливается значительно позже, особенно вблизи устья, где сказываются морское влияние и оттепели. Зимой 2019/2020 гг. температурная аномалия была столь велика, что сумма отрицательных температур составила около 600°C – половину от нормы суровой зимы. В таких условиях нижний участок Мезени долго остается незамерзшим, а образующийся лед не успевает достичь больших толщин. Также выпадающий снег ложится на открытую воду или тонкий ледяной наст, препятствуя его дальнейшему росту. Подвижный ледовый покров в устье при приливных колебаниях либо уносится в Белое море, либо дробится. В результате к середине зимы устойчивый ледовый покров может вовсе отсутствовать, либо иметь малую толщину. Поэтому зона максимальных толщин льда смещается выше по течению, где влияние морских факторов становится минимальным. В среднем участке реки к этому времени ледостав уже установлен, и лед успевает набрать толщину за зиму. Также участок впадения в Мезень крупных притоков представляет собой относительно широкий плес с замедленным течением, что создает благоприятные условия для роста более мощного ледового покрова. Возможны и локальные скопления льда у устьев притоков, которые увеличивают общую толщину. Таким образом, в теплые зимы

значения максимальных толщин льда наблюдались в среднем участке русла и в местах впадения притоков, тогда как ближе к устью лед оставался тонким вплоть до разрушения ледостава.

4.2 Ледовый режим Мезенского залива в суровые и мягкие зимы

В таблице 4.2.1 приведены характеристики ледового режима Мезенского залива для рассматриваемых лет – максимальный индекс замерзания зимы, качественная оценка суровости зимы, средняя толщина льда за зимний сезон и состояние ледового покрова в апреле [ЕСИМО].

Таблица 4.2.1 – Характеристики ледового режима Мезенского залива

Год	Наибольший индекс замерзания	Зима	Средняя толщина льда за зиму	концентрация/толщина льда в апреле
2010	1029	Суровая	20	Сплоченный лёд 7–8 баллов; местами 9–10
2011	1029	Суровая	18	Сплоченный лед 10 баллов
2017	372	Мягкая	6	В заливе почти чистая вода и нилас (<10 см)
2020	307	Мягкая	5	чистая вода повсеместно; лишь крошечные остатки полей (<10 см)

Зимой 2010/2011 гг. на акватории устья сформировался устойчивый ледовый покров со средней толщиной порядка 18 – 20 см. К апрелю 2011 залив был по-прежнему покрыт сплоченным однолетним льдом (10 баллов из 10), местами отмечались ледовые торосы. Годом ранее при сопоставимом индексе замерзания лед в апреле сохранял сплоченность 7 – 8 баллов.

Мягкие зимы характеризовались тонким неустойчивым льдом со средней толщиной 5 – 6 см. Ледовый покров либо вовсе не успевал сформироваться полностью, либо разрушался задолго до конца сезона (в апреле 2017 наблюдалась практически чистая вода с мелкими полями битого льда и ниласа;

в апреле 2020 акватория повсеместно очистилась ото льда, сохранились лишь небольшие фрагменты припайного льда около берегов). Таким образом, в суровые зимы Мезенский залив полностью замерзает и сохраняет прочный лед до весны, а в аномально теплые зимы длительное время остается свободным ото льда или рано очищается от него.

Причины столь сильной межгодовой вариации ледовых условий состоят в сочетании атмосферных и морских факторов. Средняя температура воздуха над Белым морем в январе – феврале в обычные годы составляет минус 15 °С, однако под влиянием атлантических воздушных масс (система Гольфстрима) северная часть акватории может быть существенно теплее (до минус 6 °С). В холодные годы влияние Атлантики ослабевает, устанавливаются арктические антициклоны и морозы (до минус 25 °С). При этом более пресная вода южной части Белого моря (с относительно низкой соленостью около 24 -26 ‰) имеет температуру замерзания выше, чем атлантические воды на севере (до 34 ‰). Поэтому при выносе теплых вод с Баренцева моря наблюдается более позднее образование льда на севере Белого моря, а южные заливы (в том числе Мезенский) при достаточном охлаждении могут промерзнуть сильнее. Однако, в мягкие зимы теплые океанические воды и положительные аномалии температуры воздуха препятствуют устойчивому образованию льда. Даже при охлаждении поверхности Мезенского залива до минус 2 °С, циркуляция вод постоянно уносит образующийся лед на север. По оценкам, до 90% льда Белого моря выносятся в сторону Баренцева моря дрейфом, что особенно характерно для теплых зим. [Рейнеке М.Ф.,1983] [Белое море].

4.3 Выводы 4 главы

В ходе исследования получены следующие результаты:

1. Средняя продолжительность периода устойчивого ледостава за 14-летний период сократилась на 8 суток, что свидетельствует о влиянии климатических изменений на ледовый режим исследуемой реки.

2. Усиление эффекта потепления в северных широтах, подтвержденное многочисленными исследованиями, проявляется в смещении зоны максимальных толщин льда из приустьевого участка (что характерно для суровых зим) в среднее течение р. Мезень. В Мезенском заливе потепление приводит к уменьшению толщины и сплоченности ледового покрова, вызывая ранее очищение акватории ото льда в весенний период.

Данные результаты позволяют предположить связь между положением зимней ледяной «плотины» и распределением максимальных толщин льда и их влияния на формирование весенних заторов в приустьевом участке.

В теплые зимы ледяная «плотина» формировалась на большем удалении от устья, создавая подпорную зону выше по течению. При весеннем ледоходе остатки этой плотины задерживали крупные ледовые фракции, сформированные в среднем течении реки Мезень, что могло приводить к образованию заторов [АИС ГМВО]. В суровые зимы при формировании «плотины» вблизи устья и распределения максимальных толщин льда в приустьевом участке ледовых заторов не наблюдалось. Данное предположение носит оценочный характер и требует подтверждение данными многолетних натурных наблюдений и спутникового мониторинга. Таким образом, диапазон климатических сценариев (от мягкого до сурового) задает спектр влияния на ледовую обстановку и паводковую безопасность в низовьях Мезени.

Заключение

Анализ многолетних показателей температурного режима водосбора реки Мезень, представленный во 2 главе, выявил отчетливые признаки современного потепления климата, выражающегося в сокращении холодного периода, позднем наступлении осеннего устойчивого перехода и уменьшении суммы отрицательных температур воздуха. Эти климатические сдвиги напрямую отразились на ледовом режиме реки и ее устья. Как показано в главе 4, продолжительность устойчивого ледостава сократилась практически на 8 суток за период 2009 – 2022 гг. в русловой части исследуемого объекта. Также наблюдаются существенные различия в распределении толщин льда по руслу и характера ледовых показателей Мезенского залива в характерные суровые и мягкие зимы, что может влиять на интенсивность и расположение заторов льда весной.

Применение методов МСА зарекомендовало себя как эффективный инструмент для районирования исследуемого объекта по характеру ледового режима. Условно можно выделить верхнюю, среднюю и приустьевую русловые зоны, каждая из которых отличается специфическими условиями ледообразования. Вместе с тем обнаружено явление «перебегов» пунктов наблюдений – отдельные гидропосты могут в разные годы относиться к разным участкам. Такой эффект связан с межгодовой изменчивостью и влиянием локальных факторов. Тем не менее метод МСА позволил обоснованно разделить русло реки на однородные участки и тем самым уточнить территориальные рамки действия прогнозных зависимостей.

Оценка классических эмпирических формул для моделирования и прогноза характеристик ледового режима (глава 3) показала их применимость и ограничения для реки Мезень. Установлено, что для русловых условий формулы в целом работоспособны и после незначительной калибровки коэффициентов обеспечивают приемлемую точность (погрешность порядка 10 – 15 %). Для

устьевой области (Мезенская губа) применение эмпирической зависимости также показало эффективные результаты, но методика требует учета температурного влияния воды из-за географического положения объекта. В целом, эмпирические модели можно считать полезным инструментом моделирования и оценочного прогноза, но их параметры необходимо периодически переоценивать с учетом внешних воздействий.

Визуализация результатов исследования с помощью пакета Surfer существенно повысила наглядность и информативность проведенного анализа. Были построены карты для водосбора, отражающие пространственное распределение температурных характеристик и их изменчивость за многолетний период времени. Также были получены карты распределения толщины льда по руслу реки, позволяющие сравнить условия ледообразования за характерные суровые и теплые зимние сезоны.

Перспективы дальнейших исследований заключается в углубленном анализе отдельных аспектов ледового режима реки Мезень и расширении географии анализа. Представляет интерес привлечение данных дистанционного зондирования (спутниковых снимков ледовой обстановки) для верификации и дополнения наземных наблюдений и данных модельного реанализа. Также более детальная модель ледообразования, учитывающая теплообмен и гидродинамику, могла бы повысить физическую обоснованность прогнозов. Целесообразно провести аналогичный комплексный анализ для других рек северной части Европейской территории России для выявления общих тенденций изменения ледового режима на фоне глобального потепления климата.

Список использованных источников

1. Агафонова С. А., Михайлюкова П. Г., Колий В. М. Формирование ледовой плотины в низовьях рек Мезень и Кулой с 1983 по 2020 гг. // Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова. — 2021. — Т. 16, № 3. — С. 445–456.
2. АИС ГМВО (Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения: 04.02.2025).
3. Белое море [Электронный ресурс] // Большая российская энциклопедия: [сайт]. — Режим доступа: <https://bigenc.ru/c/beloe-more-f92e7d> (дата обращения: 12.04.2025).
4. Вайновский П. А., Малинин В. Н. Методы обработки и анализа океанологической информации. Многомерный анализ / П. А. Вайновский, В. Н. Малинин. — СПб.: Изд-во РГГМИ, 1992. — 96 с.
5. ВНИИГМИ—МЦД [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://meteo.ru> (дата обращения: 20.09.2024).
6. Восточно-Европейская равнина [Электронный ресурс] // Большая российская энциклопедия: [сайт]. — Режим доступа: <https://bigenc.ru/c/vostochno-evropeiskaia-ravnina-e8ecd2> (дата обращения: 16.09.2024).
7. Вуглинский В. С. Оценка изменений характеристик ледового режима водных объектов для различных регионов страны в современных климатических условиях // Вестник Санкт-Петербургского университета. — 2014. — С. 32–45.
8. Георгиевский М. В., Горшкова Н. И., Хомякова В. А., Георгиевский Д. В., Пленкина А. К. Влияние климатических изменений в осенне-зимний период на гидрологический режим рек бассейна Малой Северной Двины // Гидрометеорология и гидрология. — 2021. — С. 466–479.

9. Георгиевский Ю. М., Шаночкин С. В. Гидрологические прогнозы : учеб. пособие / Ю. М. Георгиевский, С. В. Шаночкин. — СПб. : РГГМУ, 2007. — 436 с.
10. Германов И. В. Расчёт толщины ледяного покрова рек Севера ЕТР на основе метеорологических данных // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. — 2014. — № 33. — С. 17–23.
11. Горгуца Р. Ю., Миронов М. Е. Природная среда и ледовые нагрузки (на примере Обской губы): монография. — СПб.: Политех-Пресс, 2025. — 184 с.
12. Демиденко Н. А. Современные особенности гидрологического режима устьевых областей бассейна Белого моря / Н. А. Демиденко // Меняющийся климат и социально-экономический потенциал Российской Арктики. — 2016. — Т. 2. — С. 95–148.
13. Донченко Р. В. Ледовый режим рек СССР / Р. В. Донченко. — Л.: Гидрометеоздат, 1987. — 242 с.
14. Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО): портал [Электронный ресурс] / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). — Режим доступа: <http://esimo.ru/portal> (дата обращения: 30.05.2025).
15. Жилина И. Ю. Потепление в Арктике: возможности и риски // Экономические и социальные проблемы России. — 2021. — № 1. — С. 66–87.
16. Задача Стефана [Электронный ресурс] // Википедия: свободная энциклопедия. — Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Задача_Стефана (дата обращения: 11.03.2025).
17. Кантаржи И. Г., Аншаков А. С. Режим волн на подходе и на акватории порта / И. Г. Кантаржи, А. С. Аншаков. — Москва: Изд-во МИСИ-МГСУ, 2020. — 54 с.
18. Климатические данные городов по всему миру [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://ru.climate-data.org> (дата обращения: 15.09.2024).

19. Климаты Беломорья: почему теплеет север России [Электронный ресурс] // Scientific Russia. — Режим доступа: <https://en.scientificrussia.ru/articles/klimat-belomora-pocemu-tepleet-sever-rossii-intervu-s-direktorom-instituta-vodnyh-problem-severa-karns-ran-le-nazarovoj-2> (дата обращения: 24.05.2025).
20. Мезенская ПЭС [Электронный ресурс] // Википедия: свободная энциклопедия. — Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Мезенская_ПЭС (дата обращения: 22.05.2025).
21. Морвести: аналитика [Электронный ресурс] // Morvesti.ru. — Режим доступа: <https://morvesti.ru/analitika/1692/72216> (дата обращения: 20.05.2025).
22. Научные журналы России. Национальный атлас России [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://nationalatlas.ru> (дата обращения: 15.09.2024).
23. Постановка и решение задачи с помощью надстройки «Поиск решения» [Электронный ресурс] // Microsoft Support. — Режим доступа: <https://support.microsoft.com/ru-ru/office/постановка-и-решение-задачи-с-помощью-надстройки-поиск-решения-5d1a388f-079d-43ac-a7eb-f63e45925040> (дата обращения: 17.03.2025).
24. Расписание погоды [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://rp5.ru> (дата обращения: 11.10.2024).
25. Рейнеке М. Ф., сост. Лоция Белого моря. — Санкт-Петербург: Типография Морского ведомства, 1849. — 312 с. (переизд. 1983). — Режим доступа: https://parusa.narod.ru/bib/books/ws_loc (дата обращения: 12.04.2025).
26. Ромашова К. В., Хаустов В. А., Хренов А. А. Оценка многолетних изменений максимальных снегозапасов и водоотдачи Северного края России // Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации: материалы конф. — СПб.: РГГМУ, 2019. — С. 294–296.
27. Ситникова Я. А. Моделирование процесса формирования максимального стока: выпускная квалификационная работа (бакалаврская). — Санкт-Петербург: Российский государственный гидрометеорологический университет, 2023. — 87 с.

28. Сумачев А. Э. Совершенствование методов прогнозирования характеристик ледового режима рек бассейнов Баренцева и Белого морей: дис. ... канд. техн. наук. — Санкт-Петербург: Государственный гидрологический институт, 2022. — 173 с.
29. Терский П. Н., Панченко Е. Д., Горин С. Л., Агафонова С. А., Василенко А. Н., Куликова Ж. М. и др. Исследования зимнего режима устьев рек Белого моря в 2017–2020 гг. // *Океанология*. — 2021. — Т. 61, № 6. — С. 1006–1008.
30. ARCTIC_MULTIYEAR_PHY_002_003 [Электронный ресурс] // Copernicus Marine Environment Monitoring Service. — DOI: 10.48670/moi-00007. — Режим доступа: https://data.marine.copernicus.eu/product/ARCTIC_MULTIYEAR_PHY_002_003/description (дата обращения: 20.05.2025).
31. Beltaos S. Hydrodynamic properties of ice-jam release waves in the Mackenzie Delta, Canada // *Cold Regions Science and Technology*. — 2014. — Vol. 103. — P. 91–106. — DOI: 10.1016/j.coldregions.2014.03.011.
32. Chechin D. G.; Repina I. A.; Artamonov A. Yu.; et al. Quantifying spatial heterogeneities of surface heat budget and methane emissions over West-Siberian peatland: highlights from the Mukhrino 2022 campaign // *Forests*. — 2024. — Vol. 15, № 1. — Art. 102. — DOI: 10.3390/f15010102.
33. ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present (ECMWF Reanalysis v5) [Электронный ресурс] / Copernicus Climate Change Service. — DOI: 10.24381/cds.bd0915c6. — Режим доступа: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-pressure-levels> (дата обращения: 11.02.2025).
34. Free Open-Source Weather API [Электронный ресурс] // Open-Meteo. — Режим доступа: <https://open-meteo.com/> (дата обращения: 11.10.2024).
35. Gulf Stream [Электронный ресурс] // Wikipedia: the free encyclopedia. — Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Gulf_Stream (дата обращения: 15.09.2024).

36. Lindenschmidt K.-E.; Briggs R.; Khan A. A.; Puestow T. Elements and processes required for the development of a spring-breakup ice-jam flood forecasting system (Churchill River, Atlantic Canada) // *Water*. — 2024. — Vol. 16, № 11. — Art. 1557. — DOI: 10.3390/w16111557.
37. Morproekt.ru [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://morproekt.ru/> (дата обращения: 20.05.2025).
38. Stefan's equation for sea ice thickness [Электронный ресурс] // EarthCalculus. — Режим доступа: <http://www.earthcalculus.com/stefans-equation-for-sea-ice-thickness/> (дата обращения: 11.03.2025).
39. U.S. Army Corps of Engineers. Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.erdc.usace.army.mil/Locations/CRREL/> (дата обращения: 28.11.2025).
40. World Meteorological Organization. Climate [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://wmo.int/topics/climate> (дата обращения: 07.11.2024).