

Санкт-Петербургский государственный университет

Кафедра гидрологии суши

ЗЕМИЛОВА Мария Игоревна

Выпускная квалификационная работа

Оценка и прогнозирование ледового режима в современных климатических условиях на примере реки Енисей и его притоков

Уровень образования:

Направление *05.04.04 «Гидрометеорология»*

Основная образовательная программа *«Опасные гидрологические явления: от мониторинга до принятия решений (ГОЯ)»*

Научный руководитель:
зав. кафедрой гидрологии суши, СПбГУ, к.г.н.,
Пряхина Галина Валентиновна

Консультант:
асс. кафедры гидрологии суши, СПбГУ, к.т.н.,
Сумачев Александр Эдуардович

Рецензент:
старший научный сотрудник, к.г.н., ГГИ,
Банщикова Любовь Святославовна

Санкт-Петербург
2023

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Исследуемая территория и состояние изученности рассматриваемой темы б	
1.1. Физико-географическое описание исследуемой территории	6
1.2. Гидрологическая изученность исследуемого региона.....	9
1.3. Состояние изученности рассматриваемой темы	10
Глава 2. Климатическая характеристика исследуемой территории	15
2.1. Общие сведения о климате исследуемой территории	15
2.2. Многолетняя вариация температуры воздуха за холодный сезон	16
Глава 3. Особенности ледового режима рек бассейнов Карского моря в условиях современного климата.....	24
3.1. Наводнения в истории Красноярского края.....	26
3.2. Ледовый режим рек в период замерзания.....	27
3.3. Ледовый режим в период ледостава.....	34
3.4. Ледовый режим в период вскрытия.....	50
3.5. Условия формирования высших уровней воды за год	62
3.6. Влияние изменений климата на ледовый режим Ангаро-Енисейского бассейна.....	67
Глава 4. Гидрологическое прогнозирование.....	70
4.1 Общие положения о гидрологическом прогнозировании	70
4.2 Современное представление о методах прогнозирования экстремальных характеристик гидрологического режима	75
Глава 5. Прогнозирование элементов ледового режима рек, разработка и верификация модели прогнозирования	77
Заключение	89

Список использованной литературы.....	91
Приложения	95

Введение

Актуальность научного исследования. В связи с наличием ежегодных изменений в фазах ледового режима различных рек возникает необходимость в составлении точных прогнозов для целесообразной разработки действий по защите от проявлений опасных гидрологических явлений в тех или иных регионах России. Негативные последствия от опасных гидрологических явлений (ОГЯ) также представляют собой значительный риск для поддержания хозяйственной деятельности. На основании этого встаёт вопрос о предотвращении таких явлений, для этого необходимо подробно изучать ледовый режим и совершенствовать методы прогнозирования.

Объекты и предмет исследования. Объектом изучения являются бассейны рек Енисей и Ангара, которые относятся к бассейну Карского моря и к региону Восточной Сибири России. Исследуемая территория в административном плане относится к республикам Тыва и Бурятия, Красноярскому краю и Иркутской области.

Предметом исследования являются метеорологические и гидрологические характеристики, которые включают в себя:

- Осенние – высшие уровни, зажорные уровни, начало ледовых явлений, ледоходные/шугоходные уровни, уровни ледостава;
- Весенние – высшие уровни за год, заторные уровни, уровни последнего дня ледостава, уровни первого дня свободного русла, высшие ледоходные уровни; максимальная толщина снега;
- Приземная температура воздуха.

Цель научного исследования заключается в разработке комплексных методических подходов к прогнозированию высших уровней воды за год в современных климатических условиях на примере реки Енисей и его основных притоков.

Задачи исследования на 2021-2022 учебный год:

1. Обзор литературных источников, посвященных исследуемой проблеме;

2. По выбранным гидрометеорологическим станциям и постам сформировать базу данных необходимых гидрометеорологических характеристик;
3. Провести первичную обработку гидрометеорологических данных.

Задачи исследования на 2022-2023 учебный год:

1. Провести совместный анализ метеорологической и гидрологической информации и выявить степень влияния изменений климата на ледовый режим рек Енисей и Ангара;
2. Выявить условия и факторы формирования высших уровней воды за год на реках Енисей и Ангара;
3. На основе выявленных закономерностей разработать комплексный подход к прогнозированию высших уровней воды за год на примере рек Енисей и Ангара;
4. Разработать и верифицировать метод прогнозирования высших уровней воды за год на примере рек Енисей и Ангара.

Материалы и методы исследования.

В работе был сделан анализ наблюдений по 17 гидрологическим постам и 14 метеорологическим станциям Ангаро-Енисейского бассейна за период наблюдений с 1950 года по 2019 год. Для этого были использованы данные гидрометеорологического мониторинга сети Росгидромета: среднемесячные значения приземной температуры воздуха, среднесуточные значения уровней воды, данные наблюдений за ледовым режимом и толщиной льда. База данных гидрологических характеристик для гидрологических постов на реках Енисей и Ангара, которая создавалась в процессе научного исследования, является основой для проведения анализа гидрометеорологических характеристик и разработки методик прогнозирования характеристик опасных гидрологических явлений за период вскрытия на реках Енисей и Ангара. Разработанная база данных содержит информацию о датах и показательных уровнях воды за период замерзания, ледостава, вскрытия и данные о максимальной толщине льда.

Глава 1. Исследуемая территория и состояние изученности рассматриваемой темы

1.1. Физико-географическое описание исследуемой территории

В данной работе рассмотрены ледовый режим и многолетняя вариация температуры воздуха бассейнов рек Енисей и Ангара, которые относятся к Восточной Сибири России. В исследуемый регион входят такие административные области, как республика Тыва и Бурятия, Красноярский край и Иркутская область. В целом, вся изучаемая территория относится и расположена в средней части Азиатского материка в центральной области России.

Енисей – самая многоводная река России, отличающаяся большим годовым стоком (в среднем 630 куб. м) и рядом крупных притоков, один из них река Ангара. Рельеф бассейна весьма сложен и разнообразен. Горы и плато занимают около половины площади, на низменности приходится около 6%, остальная часть занята холмами и межгорными котловинами.

По природным условиям, характеру строения долины и русла и водному режиму Енисей принято делить на три участка:

- Верхний Енисей – от начала реки (г. Кызыл) до устья Тубы (длина 1238 км);
- Средний Енисей – от устья Тубы до устья Ангары (длина 717 км);
- Нижний Енисей – от устья Ангары до устья Енисея (длина 2137 км).

Приведенное выше деление реки Енисей было взято за основу при проведении расчётов и анализа гидрометеорологических характеристик изучаемой территории за период 1950-2019 гг. При этом на реке Ангара было взято два гидрологических поста, расположенных ближе к её впадению в Енисей, эти посты были отнесены к среднему течению рассматриваемого бассейна (по широте).

Верхний Енисей имеет горную долину. От г. Кызыл до устья Хемчика река протекает среди горно-холмистой степной местности Тувинской котловины, имеющей отметки от 550 до 750 м. Ниже впадения Хемчика река прорывается

через западный Саян; её долина на протяжении около 280 км узкая, местами имеет вид скалистого коридора-каньона шириной 100-150 м.

У среднего Енисея до пос. Шумиха (район г. Дивногорска) изменилось регулирование, так как на этом участке располагается Красноярское водохранилище (полностью заполнено водой в 1970 г.), возникшее в результате перекрытия реки мощной высокой плотиной и создания Красноярской ГЭС. Ниже г. Красноярска к реке справа подходят отроги Енисейского кряжа (высота 500-600 м). Вплоть до устья Ангары река течет у подножий этого кряжа. Его крутые склоны местами почти отвесно поднимаются над урезом воды.

Нижний Енисей до впадения Нижней Тунгуски имеет резко ассиметричную долину шириной до 10-20 км и до 40 км – в местах расширений. До устья Хантайки ширина реки составляет 20-30 км, в районе расположения пристаней Дудинки, Усть-Порта до 150 км.

Основное питание Енисей получает от талых снеговых вод. Дождевые осадки имеют второстепенное значение, в более меньшей степени участвуют в питании подземные воды. Однако в зимний сезон подземные воды выходят на первый план, когда питание поверхностными талыми и дождевыми водами резко уменьшается. Такие условия питания обуславливают в годовом ходе уровня воды выделение высокого и продолжительного весенне-летнего половодья, подъемы от летне-осенних паводков, обусловленных дождями, осенней и зимней меженью. Весенне-летнее половодье на Верхнем и Среднем Енисее обычно начинается в конце апреля-начале мая, на Нижнем Енисее – на 15-30 дней позднее. Половодье длится в среднем 2,5-3,5 месяца. Уровни воды колеблются в значительных пределах, так как подъёмы во время больших половодий достигают на Верхнем Енисее 5-11 м, на Среднем Енисее 10-15 м, на Нижнем Енисее 15-23 м. В низовьях Енисея на ход уровней большое влияние оказывают приливы; они наблюдаются два раза в сутки, амплитуда их колебаний в устье около 1 м. Большие приливы могут распространяться вверх по реке до г. Игарки, т. е. почти на 800 км от устья.

Бассейн р. Енисей занимает большую часть Восточной Сибири. На бассейн выпадают осадки из циклонов, зародившихся в Восточной Сибири, Западной Сибири, а также в Атлантике, над Европой и на юге, за пределами этого водосбора.

В результате исследований (Бабкин, Постников, 2002) установлено, что примерно 65% осадков в бассейне Енисея выпадает из циклонов, зародившихся над территориями Восточной Сибири и Западной Сибири, а 35% — над акваторией Атлантического океана, Европой и в южной зоне их образования. В засушливые годы доля осадков, выпадающих из циклонов местного образования, достигает 50%, а во влажные годы снижается до 30%. Однако во влажные годы заметно возрастает доля западносибирских и южных циклонов в увлажнении рассматриваемой территории (Бабкин, Постников, 2002).

Сток Енисея (Водные ресурсы..., 2008) формируется при значительном участии воздушных потоков, возникающих в результате обмена энергии между громадным накопителем тепла — Мировым океаном — и атмосферой, а также Мировым океаном и сушей при активном влиянии Арктики и под воздействием самого большого в мире Евразийского континента.

Основная роль в увлажнении бассейна Енисея принадлежит циклоническим осадкам. Над бассейном Енисея выпадают осадки при прохождении над ним циклонов, зародившихся в указанных зонах, а также образовавшихся в пределах его бассейна (восточносибирская зона). В верховья притоков Верхнего Енисея смещаются циклоны, зародившиеся над Монголией и Китаем.

В бассейне Енисея серьезной преградой для вторжений арктических воздушных масс являются горные массивы Средне-Сибирского плоскогорья. Здесь арктический воздух растекается в разных направлениях следуя рельефу этого горного региона, поэтому образование фронтальных циклонов затруднено. Вместе с тем наблюдаются благоприятные условия для образования термических циклонов, так как нагрев горных склонов, в большинстве своем лишенных увлажненного почвенного покрова, способствует интенсивному развитию

восходящих движений воздуха (Бабкин, Постников, 2002). Такой циклоногенез происходит в частных бассейнах Енисея: Нижней Тунгуски, Подкаменной Тунгуски и Ангары.

Значительное влияние (Водные ресурсы..., 2008) на увлажнение бассейна Енисея оказывают атмосферные процессы, происходящие в бассейне соседней Оби. Часть циклонов, образовавшихся в бассейне Оби, смешается на территорию бассейна Енисея, что способствует выпадению на его водосбор атмосферных осадков. Обычно вторжения этих циклонов происходят в бассейны Нижней Ангары, Нижней и Подкаменной Тунгусок.

1.2. Гидрологическая изученность исследуемого региона

В гидрологическом отношении исследуемый регион можно считать весьма изученным, также в пределах территории бассейна Енисея речная сеть хорошо развита. Территория деятельности ФГБУ «Среднесибирское УГМС» охватывает Ангаро-Енисейский бассейн. В пределах изучаемого бассейна на 2020 год (Обзор состояния системы..., 2019, 2020, 2021) действует 183 речных и 25 озерных наблюдательных подразделений. Исходя из цифр, представленных в обзорах за 2019-2021 года, тенденция изменений в количестве действующих постов неоднозначна, так как есть вероятность, что некоторое количество постов добавляется в имеющиеся различные категории. Так, в 2019 году действующих речных подразделений было 182, затем в 2020 – 184, и в 2021 – уже 183. Количество действующих озерных гидрологических постов не изменилось. На Среднесибирское УГМС в 2021 году приходилось 27 работающих автоматизированных гидрологических комплексов, из них 14 – работали более 95% времени, также отмечается 74% качества информации. На 14% гидрологических постов первого разряда в течение всего года расходы воды не измерялись. Также в этом же году было выполнено 95% плана гидрологических наблюдений за уровнем воды. На Среднесибирском УГМС остался 1 законсервированный, но не закрытый пост.

В таблице 1.1 представлены гидрологические посты, используемые в данной работе. Все представленные ниже гидрологические посты находятся в ведении Среднесибирского УГМС.

Таблица 1.1. Гидрологические посты на реках Енисей и Ангара

№ г/п	Название водотока	Название поста	Расстояние от устья, км ²	Площадь водосбора, км ²	Период действия (открыт)	Высота нуля графика	
						Высота, м	Система высот
1	р. Енисей	г. Кызыл	3486	115 000	28.04.1926	615,5	БС
2	р. Енисей	с. Подсинее	2900	192 000	17.09.1949	246	БС
3	р. Енисей	г. Красноярск	2462	300 000	04.09.1902	134,26	БС
4	р. Енисей	с. Казачинское	2202	353 000	14.11.1902	82,96	БС
5	р. Енисей	г. Енисейск	2054	1 400 000	28.06.1902	64,78	БС
6	р. Енисей	с. Назимово	1876	1 440 000	10.10.1933	52,49	БС
7	р. Енисей	с. Ярцево	1774	1 460 000	15.10.1936	41,63	БС
8	р. Енисей	д. Бахта	1427	1 770 000	10.06.1947	17,29	БС
9	р. Енисей	с. Верещагино	1171	1 850 000	01.01.1948	6,1	БС
10	р. Енисей	с. Селиваниха	974	2 340 000	04.07.1912	1,27	БС
11	р. Енисей	с. Курейка	864	2 380 000	01.05.1947	-0,85	БС
12	р. Енисей	г. Игарка	697	2 440 000	03.02.1936	0,03	БС
13	р. Енисей	с. Потапово	538	2 480 000	23.09.1949	-1,93	БС
14	р. Енисей	г. Дудинка	433	2 480 000	08.07.1912	-2,71	БС
15	р. Енисей	с. Караул	253	2 540 000	11.10.1953	-1,63	БС
16	р. Ангара	с. Богучаны	316	866 000	25.06.1929	121,15	БС
17	р. Ангара	д. Каменка	207	900 000	07.09.1947	108,36	БС

1.3. Состояние изученности рассматриваемой темы

Над областью морской Арктики изменения температуры воздуха (Второй оценочный доклад..., 2014) характеризуются быстрым потеплением с конца 1990-х годов, отмечен абсолютный рекорд температуры летом 2012 года. С другой стороны, исторические (с 1924 г.) и современные (спутниковые с 1979 г.) данные о площади льда свидетельствуют об уменьшении площади льда летом в сибирских арктических морях (Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское моря и часть Чукотского моря до Берингова пролива) и в Арктике в целом, ускорившемся с конца 1990-х годов, что согласуется с повышением температуры воздуха в морской Арктике.

Наилучшим индикатором изменений климата в морской части Арктики являются морские льды. В конце XX в. — начале XXI в. в Северном полушарии

наблюдалось уменьшение площади морского льда на фоне ее значительной межгодовой изменчивости. Особенно быстро в последнее тридцатилетие сокращалась минимальная в сезонном ходе (сентябрь) площадь морского льда. Абсолютный минимум площади льда за весь период наблюдений был достигнут в сентябре 2012 г. Одновременно с этим отмечалось и уменьшение толщины дрейфующих льдов. Замерзание в арктических морях происходило позже, чем в 1965—1975 гг., в среднем на 12 сут. Позже других районов арктических морей — в среднем на 21—22 сут — ледообразование наступало в юго-западных частях Карского и Чукотского морей. При этом продолжительность ледового периода уменьшилась на 40 сут по сравнению с периодом 1965—1975 гг. и в среднем составила 284 сут.

В работе (Гельфан А.Н., Фролова Н.Л. ..., 2021) авторы говорят о влиянии изменения климата на годовой и максимальный сток рек в России. Так, отмечается, что в 1976-2017 гг. суммарный годовой сток воды в моря Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское вырос на 7% по сравнению с 1936-1975 гг. Также говорится о росте стока у пяти главных рек, которые впадают в Карское море, на 3%.

Для бассейна Енисея были оценены доли вкладов атмосферных осадков, выпавших из циклонов каждой зоны их зарождения, в изменение водности рассматриваемой реки. При этом весь бассейн Енисея был подразделен на три частных водосбора: Верхний Енисей, Ангара, Нижняя Тунгуска.

В качестве года с пониженной водностью был выбран 1982 г., когда сток Енисея составлял 237 мм, т. е. он был ниже нормы на 3%. В многоводный 1983 г. сток Енисея равнялся 288 мм (выше нормы на 18%). Коэффициент возобновления показывает, сколько раз в год обновляется объем воды в русле реки Енисей. Объем воды русле реки = 27,9 куб. км. Коэффициент возобновления воды в русле реки = 23. Наибольшей водностью обладает р. Енисей (651 куб. м. в год), в бассейне которой, занимающей 15% территории страны, формируется 15,8% водных ресурсов России, имеющих наименьшую изменчивость ($C_v = 0,08$). Заметна корреляция ($r = 0,59$) для стока р. Енисей за последние 25 лет.

Данные по водохранилищам, расположенным на реке Енисей:

1. Красноярское водохранилище. Год заполнения – 1967. Площадь зеркала при НПУ, кв. км. = 2000. Полный объём = 73,3 куб. км., полезный объём = 30,4 куб. км.

2. Саяно-Шушенское водохранилище. Год заполнения – 1980-1987. Площадь зеркала при НПУ, кв. км. = 621. Полный объём = 31,3 куб. км., полезный объём = 15,3 куб. км.

В соответствии с данными наблюдений на мировой метеорологической сети, с 1970-х гг. отмечается четкий тренд повышения глобальной температуры воздуха, причиной которого большинство климатологов считает увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере (IPCC 1995, 2001, 2007). При этом в течение целого ряда лет в этот период глобальная температура была выше, чем за все 150 лет метеорологических наблюдений. Представляет большой теоретический, а также и практический интерес выявление реакции на это потепление водных ресурсов и водного режима рек на территории России.

В связи с этим в ГГИ (Водные ресурсы..., 2008) для количественной оценки происходящих изменений водных ресурсов и водного режима рек России, выявления особенностей этих изменений в различных физико-географических зонах и их причин, а также районирования территории страны по их направленности и интенсивности, был разработан и реализован методологический подход.

Основой диагноза современных изменений речного стока на территории России является комплексный статистический анализ динамики весеннего, летне-осеннего и зимнего стока средних рек, а также его внутригодового распределения. Выбор в качестве объектов исследований средних рек очевиден, поскольку динамика их стока определяется, прежде всего, климатическими факторами, а их бассейны являются репрезентативными для соответствующих физико-географических зон.

Был подготовлен архив данных по месячному стоку 300 рек, расположенных в пределах России и сопредельных территорий. По большинству рек архив включает данные по 2005 г. включительно.

На первом этапе выполнялся комплексный статистический анализ рядов сезонного и месячного стока с целью выявления возможных резких изменений (переломов во временном ходе) в многолетних колебаниях водности, вызванных климатическими факторами.

На втором этапе оценивались изменения сезонного и месячного стока рек в последние десятилетия, в течение которых на преобладающей части территории страны произошло наиболее существенное повышение температуры воздуха за весь период инструментальных наблюдений.

Методика статистического анализа была использована применительно к стоку средних рек, многолетняя динамика которого определяется климатическими факторами. Реализация методического подхода иллюстрировалась на примере анализа стока р. Юг у д. Подосиновец (площадь водосбора 15200 кв. км.). Параметры линейных трендов оценивались за многолетние периоды 1931-2005 гг. и 1946-2005 гг. В процессе анализа было выявлено, что сток в зимние месяцы за (последние) 28 лет увеличился по сравнению со средним стоком за предшествующий многолетний период на 45-55%.

В ГГИ исследования изменений водности рек в условиях происходящего потепления климата ведутся с конца 1980-х гг. Основные результаты этих исследований представлены в (Георгиевский и др., 1996; Георгиевский и др., 1997; Шикломанов, Георгиевский, 1995; 2000; 2002; 2003; 2004; Шикломанов и др., 2003).

Основной особенностью современных изменений сезонного стока рек является увеличение в последние десятилетия их водности в зимний сезон практически на всей территории России. В бассейне Енисея и на реках Забайкалья увеличение стока холодного периода составило преимущественно 10—20%. Приводимое исследование (Водные ресурсы..., 2008) говорит о

результатах для периода 1978-2005 гг., отмечается, что в бассейне Верхнего Енисея произошло незначительное уменьшение весеннего стока в пределах 5%.

Анализ данных изменения месячного стока на г/п Игарка на р. Енисей (Водные ресурсы..., 2008) показал, что зимний сток в большей степени увеличился. Такое явление связано с расположением крупнейших водохранилищ России на Енисее. На реке Ангара (г/п Богучаны), и без того сильно зарегулированной озером Байкал, сооружение каскада водохранилищ привело к практическому выравниванию стока в течение всего года.

В нашей стране и за рубежом (Балек, 1970) получил широкую известность метод прогноза стока рек, разработанный в Советском Союзе (Алехин, 1963). Этот метод основан на учете предыстории колебаний водных ресурсов с помощью полного коэффициента корреляции R между стоком текущего года и стоком лет, сдвинутых на определенное время τ .

В 1950-1970-х гг. получил распространение метод оценки водных ресурсов на перспективу по их среднему многолетнему значению («норме») с учетом влияния факторов хозяйственной деятельности, а при наличии в рядах стока тренда — по уравнению (линии) тренда.

Глава 2. Климатическая характеристика исследуемой территории

2.1. Общие сведения о климате исследуемой территории

Основные черты климата в пределах исследуемого региона определяются такими факторами: радиационным режимом, своеобразной циркуляцией атмосферы над данным районом, расположенным в центральной области евроазиатского материка, влиянием Северного Ледовитого океана и его морей, а также характером рельефа. Климат бассейна реки Енисей отличается резко выраженной континентальностью; здесь суровые зимы и непродолжительные летние сезоны. В южной части бассейна Енисея в некоторые годы зафиксированы заморозки в июне и даже в августе. Суточная амплитуда колебания температуры воздуха достигает 10-20, иногда 30°C.

Над бассейном реки Енисей перенос воздушных масс осуществляется в направлении с запада на восток, временами наблюдаются выходы циклонов с юга или юго-запада, нередко обуславливающие обильные осадки. Осенью на территорию исследуемого региона вторгаются воздушные массы с севера – со стороны Баренцева и Карского морей. Зимой (в декабре-феврале) циклоническая деятельность проявляется слабо по причине развития антициклогенеза. Увеличение циклоничности наблюдается в северной части района, где располагается барическая ложбина, простирающаяся от Исландского минимума. Зимой циклоны чаще всего проходят по побережью Карского моря. Вблизи полярного круга наибольшая их повторяемость отмечается преимущественно осенью и в начале зимы, что обуславливает повышенные осадки, сумма которых местами достигает в октябре максимальной годовой величины. Южнее р. Ангары годовой максимум осадков приходится на июль и август.

Циклоническая деятельность более развита в западной части бассейна, так как восточнее Енисея, гор Енисейского кряжа и Путорана происходит окклюдирование циклонов, в связи с чем к востоку отмечается ослабление облачности, уменьшение количества осадков и замедление скорости ветра. Весьма существенное влияние на климат и сток рек в горах оказывает

географическое положение хребтов относительно направления движения влажных воздушных масс.

На территории бассейна Енисея, вытянутой в меридиональном направлении, более чем на 30° , хорошо проявляется широтная зональность, а наличие гор высотой более 1000 м обуславливает вертикальную поясность климатических условий. Бассейн реки Енисей расположен в нескольких характерных широтных зонах:

- 1) арктическая полярная пустыня;
- 2) тундра;
- 3) лесотундра;
- 4) тайга;
- 5) травяные леса с островами лесостепи;
- 6) островные степи (настоящие и опустыненные);
- 7) горнотаежные леса и гольцы.

2.2. Многолетняя вариация температуры воздуха за холодный сезон

Влияние изменений климата на ледовый режим рек включает в себя определенное количество факторов, один из них – это колебания приземной температуры воздуха за холодный сезон.

На изменение климата, по мнению многих ученых, в последние годы оказывают значительное влияние углекислый газ, другие парниковые газы и аэрозоли. Глобальное потепление зафиксировано ещё с конца XX в. – начала XXI в. (со второй половины 1970-х годов). Основным индикатором этого явления выступает глобальная (осредненная по всему земному шару) приповерхностная температура воздуха. По данным исследований (Второй оценочный доклад..., 2014) период после 1976 года отличается наиболее сильным потеплением, а начало XXI в. считается самым теплым 12-летним периодом.

В моей работе оценка многолетней вариации температуры воздуха за холодный сезон проводилась на основе данных по 14 метеорологических станциям за период 1950-2019 год. При этом на основе деления рек Енисей и

Ангара по водному режиму и другим составляющим на три участка метеорологические станции по своему расположению были отнесены к одному из трех областей Енисея (таблица 2). Период наблюдений разит на базовый (1950-1980) и контрольный (1981-2019).

Таблица 2.1. Метеорологические станции на реках Енисей и Ангара

Верхнее течение	Среднее течение	Нижнее течение
с. Тоора-Хем	г. Красноярск	г. Енисейск
г. Кызыл	г. Братск	с. Ярцево
г. Иркутск	с. Казачинское	с. Байкит
г. Минусинск	с. Богучаны	с. Верхнеимбатск
		с. Туруханск
		г. Игарка

Анализ многолетней вариации температуры воздуха (таблица 2.2) показал, что увеличение средней многолетней температуры воздуха за холодный сезон по станциям в районе верхнего течения реки Енисей статистически значимое. За период 1950-2019 год средняя по району верхнего Енисея температура воздуха за холодный сезон составила -9 °С. По рассматриваемому району средняя температура воздуха за холодный сезон изменялась от $-12,1$ °С на метеорологической станции Тоора-Хем до $-5,9$ °С на метеорологической станции Минусинск. За рассматриваемый период 69 лет было выявлено увеличение средней температуры воздуха на $2,3$ °С (с $-10,3$ °С до -8 °С), что является статистически значимым.

Таблица 2.2. Осредненная оценка статистической значимости линейных трендов среднемесячной температуры воздуха в районе верхнего Енисея за 1950-2019

Хар-ка	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	Ср. зима
T (1950-2019), °С	0.3	-11.4	-20.5	-23.7	-19.9	-9.1	2.4	9.9	-9
T (1950-1980), °С	-0.5	-12.7	-21.8	-24.9	-21.7	-10.9	1.1	9.3	-10.3
T (1981-2019), °С	0.9	-10.3	-19.4	-22.7	-18.5	-7.6	3.4	10.4	-8.0
СКО (1950-2019), °С	1.8	3.3	3.7	3.5	3.8	3.4	2.3	1.4	1.7
СКО (1950-1980), °С	1.6	3.3	3.8	3.3	3.5	3.0	2.0	1.3	1.1
СКО (1981-2019), °С	1.7	3.0	3.2	3.4	3.4	3.0	2.1	1.4	1.3

Cs	-0.6	-0.2	-0.5	-0.2	-0.3	-0.2	-0.1	0.3	0
Cv	1.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.4	1.8	0.2	0.2
R	0.3	0.4	0.3	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.7
Значимость	+	+	+	+	+	+	+	+	+
P value Стьюдента, %	0.9	0.8	1.0	3.3	0.9	0.3	0.1	0.5	0
P value Фишера, %	56.9	44.3	42.5	58.8	66.8	47.5	36.3	63.0	39.8

На метеорологических станциях в городах Тоора-Хем, Кызыл, Иркутск и Минусинск увеличение температуры воздуха зафиксировано разными значениями. Так, наибольшее увеличение температуры воздуха зарегистрировано на метеорологической станции Кызыл, которое составило 3,1 °С, а наименьшее – на метеорологической станции Минусинск со значением 1,7 °С.

За все рассматриваемые месяцы отмечается тренд на повышение среднемесячной температуры воздуха и является статистически значимым в марте и апреле, это и привело к статистически значимому увеличению температуры воздуха за весь холодный сезон. Температура воздуха растёт на всех метеорологических станциях. Увеличение температуры воздуха, которое наиболее значимое в марте и апреле, оказывает влияние на период вскрытия Енисея и на даты освобождения ото льда русла реки.

Для района верхнего течения рассматриваемого региона был построен хронологический график изменения приземной температуры воздуха за период с 1950 по 2019 гг. на каждой метеорологической станции, расположенной в данном районе (рисунок 2.1), а также осредненные значения по этому району. Хронологический график показывает статистическое значимое увеличение приземной температуры воздуха в верхнем течении, а также положительный тренд на увеличение среднегодовой приземной температуры воздуха.

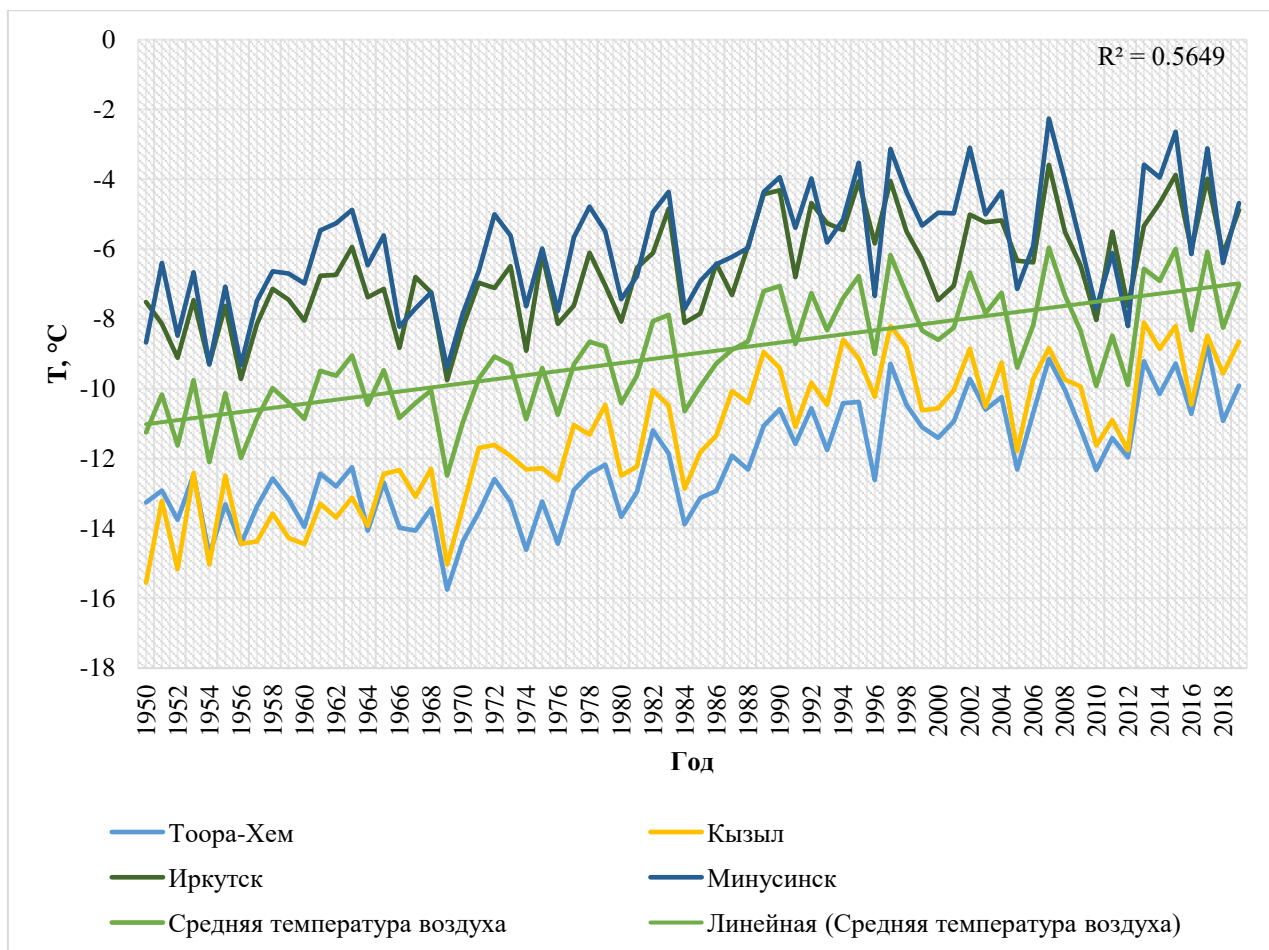


Рисунок 2.1. Хронологический график изменения приземной температуры воздуха на метеорологических станциях верхнего течения бассейна рек Енисей и Ангара за период с 1950 по 2019 гг.

Анализ многолетней вариации температуры воздуха (таблица 2.3) показал, что увеличение средней многолетней температуры воздуха за холодный сезон по станциям в районе среднего течения реки Енисей статистически значимое. За период 1950-2019 год средняя по району верхнего Енисея температура воздуха за холодный сезон составила $-9,0$ °C. По рассматриваемому району средняя температура воздуха за холодный сезон изменялась от $-5,6$ °C на метеорологической станции Красноярск, от $-8,5$ °C на метеорологической станции Братск до $-11,8$ °C на метеорологической станции Казачинское. За рассматриваемый период 69 лет было выявлено увеличение средней

температуры воздуха на 1,8 °С (с –10,0 °С до –8,2 °С), что является статистически значимым.

Таблица 2.3. Осредненная оценка статистической значимости линейных трендов среднемесячной температуры воздуха в районе среднего Енисея за 1950-2019

Хар-ка	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	Ср. зимняя
T (1950-2019), °С	-0.1	-11.2	-19.0	-21.5	-18.9	-9.5	0.1	8.0	-9.0
T (1950-1980), °С	-0.6	-11.9	-20.1	-22.1	-20.9	-11.0	-0.8	7.3	-10.0
T (1981-2019), °С	0.3	-10.6	-18.1	-21.0	-17.4	-8.4	0.8	8.5	-8.2
СКО (1950-2019), °С	2.2	3.9	4.7	4.5	4.5	3.4	2.3	1.5	1.8
СКО (1950-1980), °С	2.0	4.2	4.3	4.3	4.3	3.0	1.9	1.2	1.5
СКО (1981-2019), °С	2.2	3.7	4.8	4.6	4.1	3.4	2.4	1.5	1.7
Cs	-0.4	-0.1	-0.3	0.1	-0.3	-0.1	0.1	0.5	0.0
Cv	4.3	0.4	0.3	0.2	0.2	0.4	10.1	0.2	0.2
R	0.2	0.2	0.2	0.1	0.3	0.4	0.4	0.3	0.5
Значимость	-	-	-	-	+	+	+	+	+
P value Стьюдента, %	11.5	24.1	12.3	37.0	0.1	0.4	0.4	0.7	0
P value Фишера, %	60.8	45.7	62.5	66.3	75.6	44.9	19.0	31.1	42.0

На метеорологических станциях в городах Красноярск, Братск и Казачинское увеличение температуры воздуха зафиксировано разными значениями. Так, наибольшее увеличение температуры воздуха зарегистрировано на метеорологической станции Братск, которое составило 2 °С, а наименьшее – на метеорологической станции Казачинское со значением 1,4 °С.

За все рассматриваемые месяцы отмечается тренд на повышение среднемесячной температуры воздуха, однако является статистически значимым только с февраля по апрель, что и привело к статистически значимому увеличению температуры воздуха за весь холодный сезон. Температура воздуха растёт на всех метеорологических станциях. Увеличение температуры воздуха, которое наиболее значимое в марте и апреле, оказывает влияние на период вскрытия Енисея и на даты освобождения ото льда русла реки.

Для района среднего течения рассматриваемого региона был построен хронологический график изменения приземной температуры воздуха за период с 1950 по 2019 гг. на каждой метеорологической станции, расположенной в данном районе (рисунок 2.2), а также осредненные значения по этому району. Хронологический график показывает статистическое значимое увеличение приземной температуры воздуха в среднем течении, а также положительный тренд на увеличение среднегодовой приземной температуры воздуха.

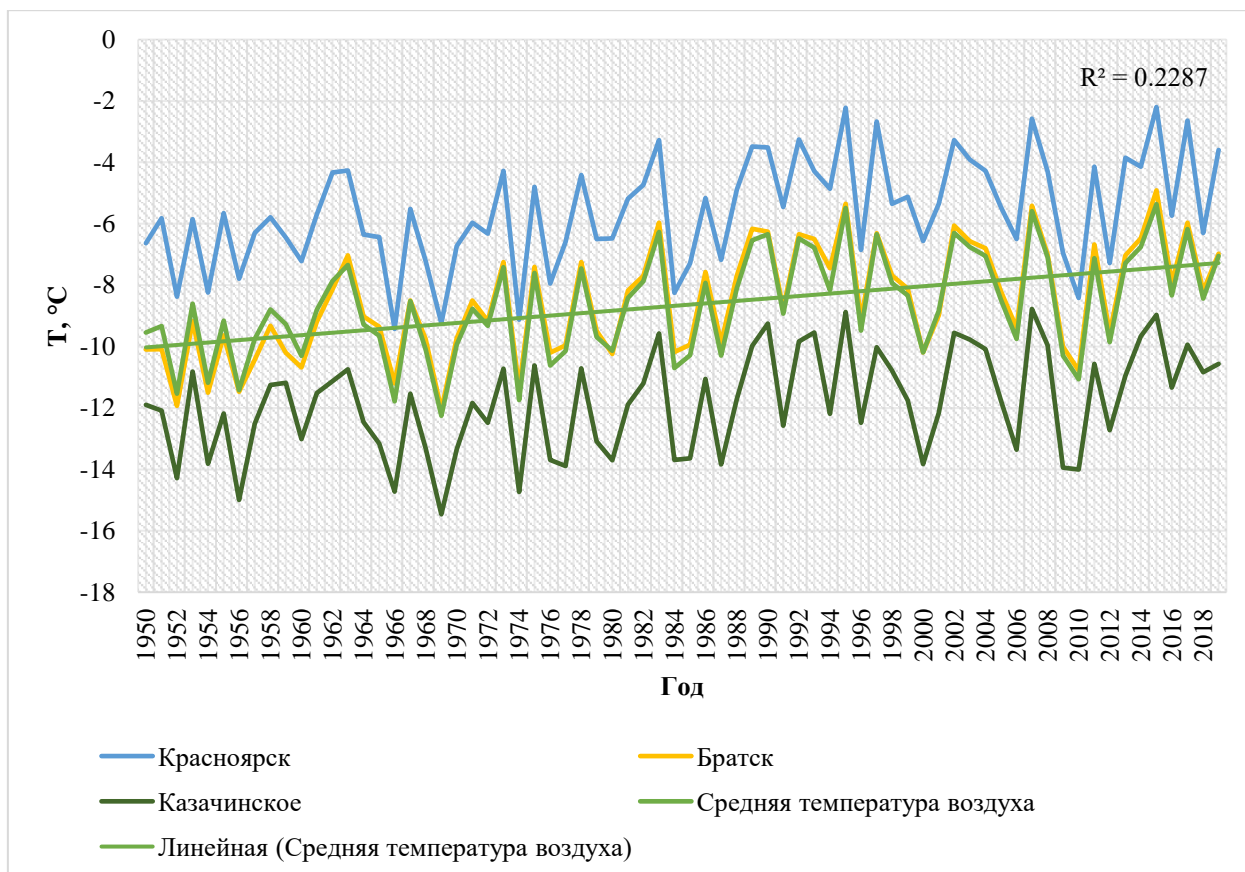


Рисунок 2.2. Хронологический график изменения приземной температуры воздуха на метеорологических станциях среднего течения бассейна рек Енисей и Ангара за период с 1950 по 2019 гг.

Анализ многолетней вариации температуры воздуха (таблица 2.4) показал, что увеличение средней многолетней температуры воздуха за холодный сезон по станциям в районе нижнего течения реки Енисей статистически значимое. За период 1950-2019 год средняя по району верхнего Енисея температура воздуха за холодный сезон составила $-12,9$ °C. По рассматриваемому району средняя

температура воздуха за холодный сезон изменялась от -9°C на метеорологической станции Енисейск до $-17,2^{\circ}\text{C}$ на метеорологической станции Игарка. За рассматриваемый период 69 лет было выявлено увеличение средней температуры воздуха на $1,9^{\circ}\text{C}$ (с -14°C до $-12,1^{\circ}\text{C}$), что является статистически значимым.

Таблица 2.4. Осредненная оценка статистической значимости линейных трендов среднемесячной температуры воздуха в районе нижнего Енисея за 1950-2019

Хар-ка	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	Ср. зимняя
T (1950-2019), $^{\circ}\text{C}$	-3.6	-17.0	-23.1	-25.5	-23.0	-13.6	-4.8	3.3	-13.4
T (1950-1980), $^{\circ}\text{C}$	-4.3	-17.7	-24.3	-26.3	-25.0	-15.2	-5.6	2.5	-14.5
T (1981-2019), $^{\circ}\text{C}$	-3.1	-16.4	-22.2	-24.9	-21.4	-12.2	-4.3	4.0	-12.6
СКО (1950-2019), $^{\circ}\text{C}$	2.8	4.7	5.2	5.1	5.0	3.9	3.2	1.8	2.1
СКО (1950-1980), $^{\circ}\text{C}$	2.8	5.1	4.6	5.0	5.0	3.6	2.4	1.3	1.8
СКО (1981-2019), $^{\circ}\text{C}$	2.6	4.3	5.5	5.2	4.5	3.8	3.6	1.9	1.8
Cs	-0.4	-0.2	-0.2	-0.1	-0.5	0.1	0.2	0.5	-0.1
Cv	2.9	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	5.0	0.8	0.2
R	0.2	0.2	0.2	0.1	0.3	0.4	0.3	0.3	0.4
Значимость	-	-	-	-	+	+	+	+	+
P value Стьюдента, %	9.8	28.3	10.8	26.4	0.5	0.2	10.4	0.1	0.0
P value Фишера, %	61.4	33.3	37.3	79.2	53.2	77.6	5.0	4.6	77.0

На метеорологических станциях в городах Енисейск, Богучаны, Ярцево, Байкит, Верхнеимбатск, Туруханск и Игарка увеличение температуры воздуха зафиксировано разными значениями. Так, наибольшее увеличение температуры воздуха зарегистрировано на метеорологической станции Братск, которое составило $2,2^{\circ}\text{C}$, а наименьшее – на метеорологической станции Байкит со значением $1,8^{\circ}\text{C}$.

За все рассматриваемые месяцы отмечается тренд на повышение среднемесячной температуры воздуха, однако является статистически значимым только в марте и мае, что и привело к статистически значимому увеличению температуры воздуха за весь холодный сезон. Температура воздуха растёт на всех метеорологических станциях. Увеличение температуры воздуха, которое

наиболее значимое в марте, оказывает влияние на период вскрытия Енисея и на даты освобождения ото льда русла реки.

Для района нижнего течения рассматриваемого региона был построен хронологический график изменения приземной температуры воздуха за период с 1950 по 2019 гг. на каждой метеорологической станции, расположенной в данном районе (рисунок 2.3), а также осредненные значения по этому району. Хронологический график показывает статистическое значимое увеличение приземной температуры воздуха в нижнем течении, а также положительный тренд на увеличение среднегодовой приземной температуры воздуха.

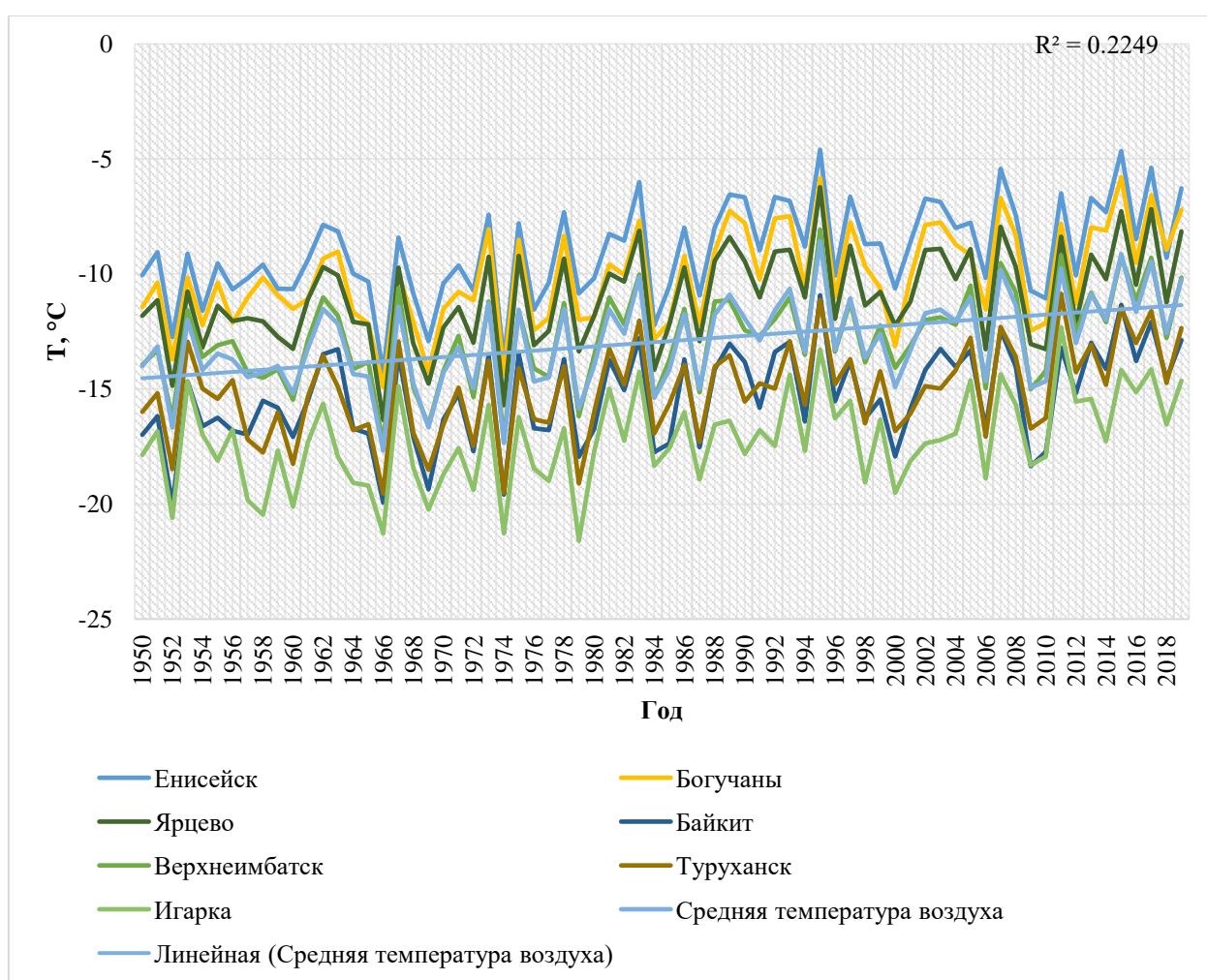


Рисунок 2.3. Хронологический график изменения приземной температуры воздуха на метеорологических станциях среднего течения бассейна рек Енисей и Ангара за период с 1950 по 2019 гг.

Глава 3. Особенности ледового режима рек бассейнов Карского моря в условиях современного климата

Изменения современного климата, а именно его потепление в последние 40 лет, проявляются в виде сдвигов фаз формирования ледового покрова и очищения рек ото льда. В связи с чем возникает необходимость анализа подобных смещений для совершенствования методик прогнозирования и минимизации последствий опасных гидрологических явлений. В магистерской диссертации рассмотрены ледовый режим рек Енисей и Ангара в период замерзания, ледостава и вскрытия.

Элементы ледового режима рек бассейна Карского моря были количественно оценены при помощи следующих характеристик: даты начала ледовых явлений, даты начала устойчивого ледостава, даты высшего уровня воды за весь период ледостава, даты окончания ледостава, даты высшего уровня воды за период весеннего ледохода, даты очищения рек ото льда, даты высшего уровня воды за год, а также максимальной толщины льда.

Влияние Красноярской ГЭС на режим Енисея. Наполнение водохранилища происходило с весны 1967 г. по август 1970 г. В следствие чего образовался глубокий водоём на Енисее (средняя глубина 36,5 м, объём воды 73,3 куб. км, площадь водной поверхности 2000 кв. км). Для Енисея особенность ледостава в естественных условиях заключалась в образовании самостоятельных перемычек ледостава в районе Осиновского Порога и у с. Атаманово (в 852 и 83 км ниже г. Красноярск соответственно), а также для Ангары у с. Рыбного (101 км от устья). Данное явление отмечалось примерно в одно и то же время – в среднем 4-11 ноября. Между ледяными перемычками замерзание происходило значительно позднее: у г. Енисейск и с. Казачинского 21-24 ноября, у с. Павловщины и с. Татарки 28 ноября-2 декабря.

После зарегулирования стока Енисея лёд с участка среднего течения почти не поступал, что резко сократило длину шугообразующего участка реки от устья Ангары до Осиновского Порога, что замедлило продвижение кромки ледостава выше этого пункта. Сроки начала ледостава сильно изменились и в нижнем

течении Енисея. У сел Ярцево и Назимово река стала сковываться льдом на 7-11 дней позднее обычных сроков, у г. Енисейска и в районе устья Ангары запаздывание составляет 15-20 дней и у с. Казачинского 20-25 дней. В районе г. Красноярска ледостав перестал образовываться. Отсутствие постоянного ледового покрова обуславливает наличие в нижнем бьефе Красноярской ГЭС незамерзающего участка реки протяжением от 50 до 200 км в зависимости от погодных условий, величины сбросов воды через турбины ГЭС и т.д.

Ледовый режим рек бассейна Карского моря. Ледовый режим рек (Ресурсы поверхностных вод..., 1973) формируется в условиях арктического, субарктического и умеренного климатического поясов центральных районов Евразии при широком распространении в этих местах многолетней мерзлоты. Исследуемый регион простирается в меридиональном направлении (52-72° с. ш.), что обуславливает хорошо выраженную широтную зональность. Появление льда на реках осуществляется под влиянием северных и северо-западных потоков воздушных масс, обычно наблюдаемых в октябре, когда температура воздуха переходит через 0° к отрицательным значениям. Наиболее раннее образование льда происходит под влиянием адвекции холодных воздушных масс, начальная стадия которой наблюдается в третьей декаде сентября – начале октября.

Вскрытие рек происходит при установлении устойчивого положительного баланса тепла на поверхности водосборов в весенний период, после перехода температуры воздуха через 0° к положительным значениям. На юге это наблюдается в середине апреля, в северной части – в конце мая-начале июля.

Фазы зимнего режима на реках бассейна Карского моря наблюдаются ежегодно, их общая продолжительность составляет более половины календарного года.

На реках ежегодно образуется ледостав, происходит это в октябре-ноябре, ледоставу предшествует период замерзания, а именно возникновение и развитие заберегов, появление шуги и ледохода. Самая устойчивая и наиболее длительная

фаза ледового режима рек рассматриваемого бассейна – это ледостав, продолжительность которого составляет 150-200 дней.

В апреле-июне реки вскрываются ото льда; в это время часто наблюдаются выходы воды на поверхность льда, образование закраин, происходят подвижки льда, отмечается весенний ледоход, возникают заторы льда и т.д.

3.1. Наводнения в истории Красноярского края

Наводнения в период весеннего половодья на равнинных реках.

Весна 1959 г. Нижний Енисей. Зима 1958-1959 гг. в бассейне Нижней Ангары и Нижнего Енисея (Наводнения в истории..., 2011) была необычайно снежной (150-200% от нормы). Весна была поздней. В конце мая наступило бурное таяние снега при средней суточной температуре воздуха 10-12° С, в начале июня 16-19° С. Дневная температура в июне доходила до 25-29° С. Из-за задержки половодья Ангары произошло совпадение гребней волн половодья рек Ангары и Подкаменной Тунгуски. Затем ниже по течению совпадение произошло с волной р. Нижней Тунгуски. В результате в низовьях р. Енисей у г. Игарка зафиксирован самый большой расход воды в реке – 159 000 куб. м./с.

Наводнения при зажорах льда.

На участке Нижнего Енисея между впадением рек Ангары и Подкаменной Тунгуски максимальный зазорный уровень наступает спустя 5-10 дней и более после прохождения через створ кромки. Причина в том, что происходит постепенное увеличение расхода воды вследствие сработки объемов воды, накопившихся в вышерасположенных зажорах. Кроме того, на имеющихся полыньях образуется шуга, которая увлекается течением под ледяной покров и стесняет живое сечение реки.

Существенное влияние на процесс зажообразования оказывает строительство ГЭС. С постройкой ГЭС вносятся заметные изменения в последовательность замерзания реки.

При сравнении наивысших зазорных уровней в начале ледостава и после постройки ГЭС можно отметить, что они повысились у с. Казачинского на 5,0 м,

у г. Енисейска на 2,6 м. В благоприятную для образования зажоров льда зиму 1984-85 гг. в районе г. Енисейска зажорный подъём составил 8,6 м. Города Енисейск и Лесосибирск оказались частично затопленными.

Одно из масштабных наводнений в исследуемом районе – наводнение в Красноярске летом 1966 года. В момент строительства Центрального стадиона была затоплена полностью вся строительная площадка и значительная часть Острова отдыха. После постройки Красноярской ГЭС подобного рода подтоплений Красноярска больше не происходило.

3.2. Ледовый режим рек в период замерзания

Появление ледяных образований в осенний период. Первичной формой ледяных образований на реке Енисей и Ангара (Ресурсы поверхностных вод..., 1973) являются забереги, которые образуются после устойчивого перехода температуры воздуха через 0 или при очень резких и кратковременных похолоданиях. Во время образования заберегов или через 1-2 дня (в зависимости от погодных условий) после образования заберегов появляются сало и шуга, сначала у берегов, затем на всей реке. На участках реки, где характерно слабое течение (скорость до 0,5 м/с) наблюдается сало. Одним из таких участков является Енисей ниже устья Подкаменной Тунгуски. На участке Енисея от истока до устья Подкаменной Тунгуски, где течение считается быстрым, наблюдается интенсивное образование шуги, особенно на порогах и перекатах. Шуга – наиболее распространённое плавучее ледяное образование. Значительное влияние в подготовительный период замерзания на ледовый режим Енисея оказывает лёд, поступающий в него из русел его притоков.

На Енисее вынос льда большими его притоками часто обуславливает начало на нём ледохода, это явление нередко оказывает большое влияние на сроки завершения летней навигации. Ангара – самый большой приток Енисея – ежегодно выносит большое количество льда в его русло, причём это происходит на 3-8 дней раньше даты появления первых ледяных образований на самом Енисее. На участке Енисея от устья Ангары до Енисейска ангарский лёд

наблюдается обычно у правого берега в виде полосы, которая занимает в среднем 0,3 – 0,6 ширины реки; на поворотах лёд распространяется на всю ширину потока, что создаёт значительные трудности для судоходства. Ближе к району гидрологического поста Назимово (150-180 км от г. Енисейска) ангарский лёд обычно растаивает.

Лёд, выносимый Нижней Тунгуской, наблюдается на 4-5 дней раньше начала ледохода на самом Енисее. Так, у с. Селиванихи (18 км ниже устья Нижней Тунгуски) средняя дата его появления 15 октября, но до с. Курейки он уже не доходит, растаивая до этого над тёплой водой Енисея. Через 7-9 дней лёд с Нижней Тунгуски доходит до устья, где образуется ледяная перемычка, после этого вынос льда прекращается. Ниже впадения р. Курейки происходит подобное вышеописанному явление.

Существенная зажорность ($p_z=70-100\%$) вследствие морфологических особенностей русла и суровых погодных условий в период замерзания характерна для Енисея. Интенсивное шугообразование на участках с повышенными скоростями течения способствует формированию скоплений толщиной 3-5 м в местах сосредоточенного падения. Максимальные зажорные подьёмы в верховье реки достигают 6,3 м, в районе г. Енисейск – 6,5 м и у с. Ярцева – 6,7 м.

На основе базы данных гидрометеорологических характеристик реки Енисей были выполнены расчёты дат образования первичных ледовых явлений в русле реки. При проведении расчётов использовалось разделение водотока на три характерных участка (глава 1, п. 1.1.), как и при расчёте среднемноголетних значений температуры исследуемого района.

На рисунке 3.1 представлена гистограмма распределения дат появления первичных ледовых явлений в верхнем течении Енисея.

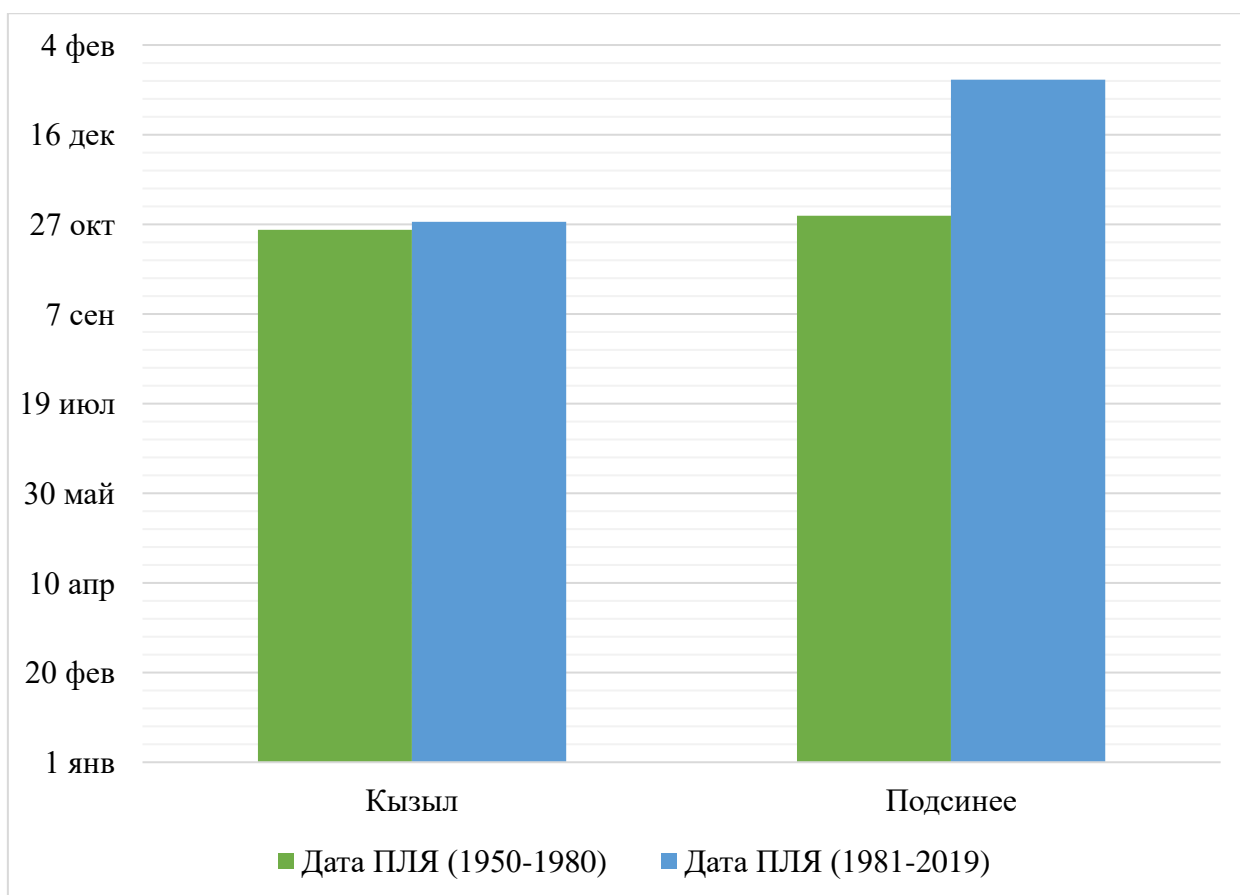


Рисунок 3.1. Даты образования первичных ледовых явлений в верхнем течении Енисея (1950-2019)

В г. Кызыл в период с 1950 по 1980 гг. (базовый период) дата появления первичных ледовых явлений в среднем приходилась на 23 октября, в период с 1981 по 2019 гг. (контрольный период) дата образования первичных ледовых явлений сместилась на 5 дней позднее – в среднем 28 октября.

В с. Подсинее в период с 1950 по 1980 гг. дата появления первичных ледовых явлений в среднем приходилась на 31 октября, в период с 1981 по 2019 гг. дата образования первичных ледовых явлений сместилась на 2 месяца позднее – в среднем 15 января.

При проведении анализа среднегодовой температуры воздуха (глава 2, п. 2.2) было выявлено её статистически значимое увеличение в данном районе на 2,3 °С. Как было отмечено выше, даты образования первичных ледовых явлений сместились на более поздние сроки. Следует вывести из полученных результатов, что с увеличением температуры воздуха с 1981 года образование

ледовых явлений теперь происходит позднее, в среднем на месяц по двум пунктам, расположенным в верхнем течении.

На рисунке 3.2 представлена гистограмма распределения дат появления первичных ледовых явлений в среднем течении Енисея.

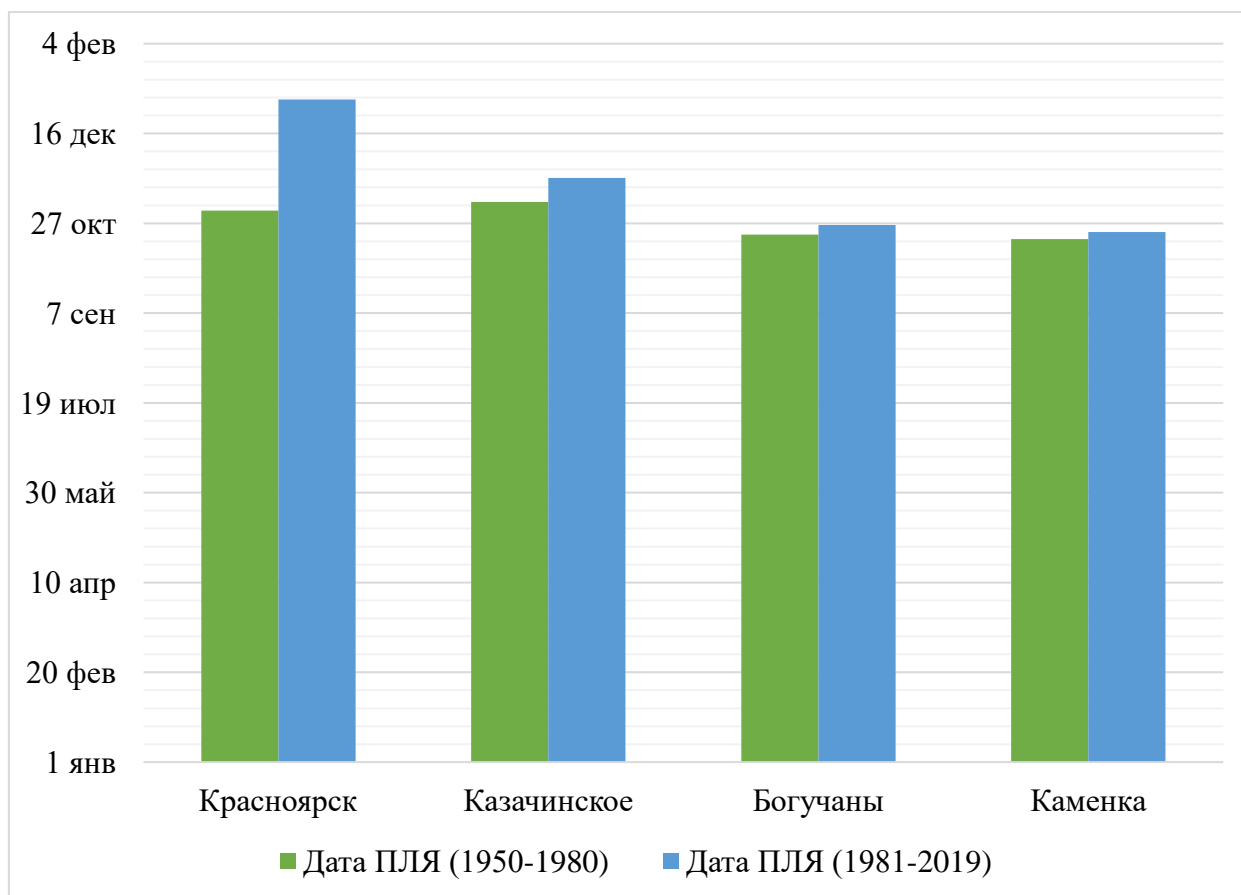


Рисунок 3.2. Даты образования первичных ледовых явлений в среднем течении Енисея (1950-2019)

В г. Красноярск в период с 1950 по 1980 гг. дата появления первичных ледовых явлений в среднем приходилась на 3 ноября, в период с 1981 по 2019 гг. дата образования первичных ледовых явлений сместилась на 2 месяца позднее — в среднем 4 января. Причиной такого большого смещения является с отсутствием ледовых явлений с 1970 года по 2019 года, за этот период первичные ледовые явления были зафиксированы только в 1982 и 1996 году.

В с. Казачинское в период с 1950 по 1980 гг. дата появления первичных ледовых явлений в среднем приходилась на 7 ноября, в период с 1981 по 2019 гг.

дата образования первичных ледовых явлений сместилась на 6 дней позднее – в среднем 21 ноября.

В с. Богучаны в период с 1950 по 1980 гг. дата появления первичных ледовых явлений в среднем приходилась на 20 октября, в период с 1981 по 2019 гг. дата образования первичных ледовых явлений сместилась на 5 дней позднее – в среднем 26 октября.

В д. Каменка в период с 1950 по 1980 гг. дата появления первичных ледовых явлений в среднем приходилась на 18 октября, в период с 1981 по 2019 гг. дата образования первичных ледовых явлений сместилась на 4 дня позднее – в среднем 22 октября.

Как и для верхнего течения рассматриваемого региона, при проведении анализа среднемноголетней температуры воздуха было выявлено её статистически значимое увеличение на 1,8 °С для среднего течения. Даты образования первичных ледовых явлений сместились на более поздние сроки. Следует вывести из полученных результатов, что с увеличением температуры воздуха с 1981 года образование ледовых явлений в среднем течении теперь происходит позднее, в среднем на 5 дней для четырёх гидрологических постов, относящихся к данному району.

На рисунке 3.3 представлена гистограмма распределения дат появления первичных ледовых явлений в нижнем течении Енисея.

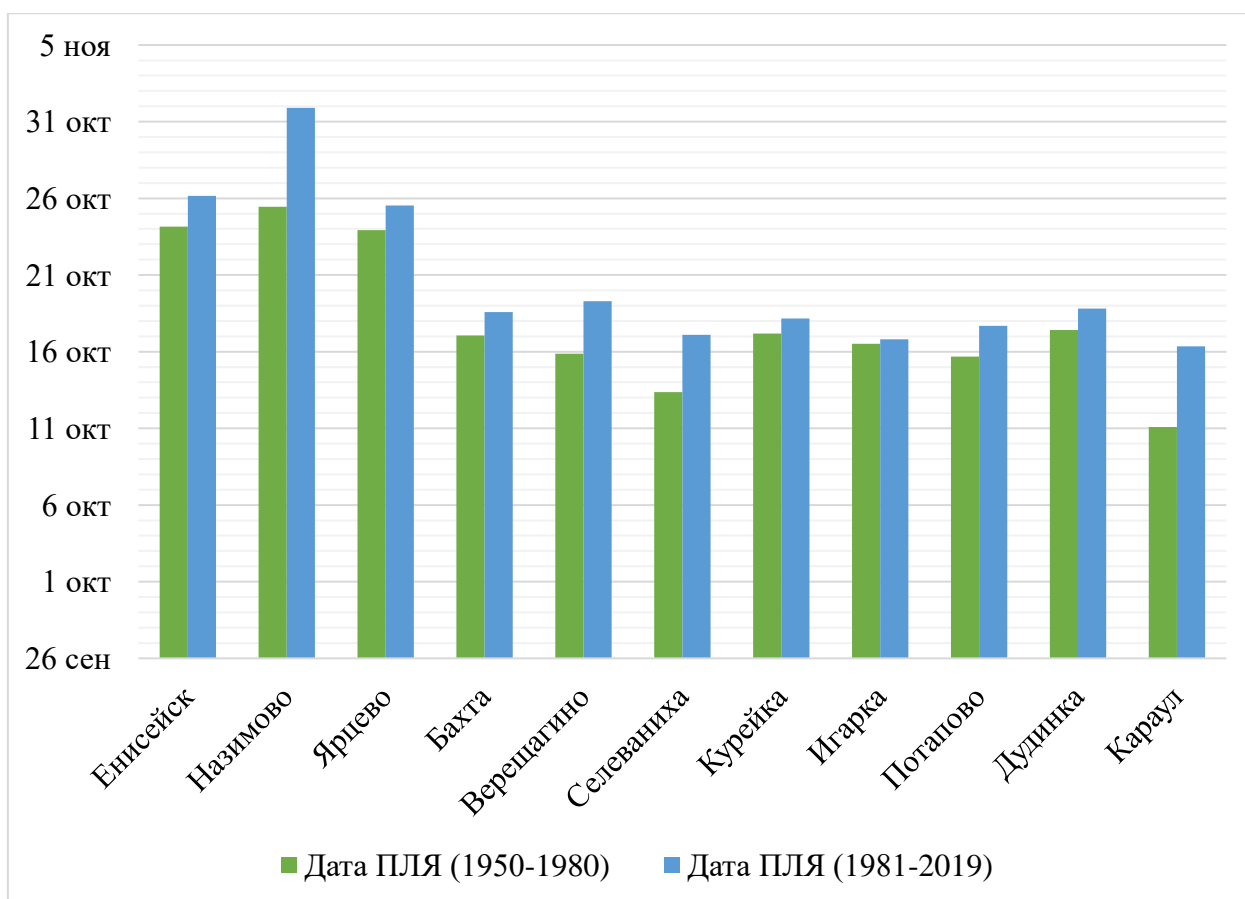


Рисунок 3.3. Даты образования первичных ледовых явлений в нижнем течении Енисея (1950-2019)

В г. Енисейск в период с 1950 по 1980 гг. дата появления первичных ледовых явлений в среднем приходилась на 24 октября, в период с 1981 по 2019 гг. дата образования первичных ледовых явлений сместилась на 2 дня позднее – в среднем 26 октября.

В д. Назимово в период с 1950 по 1980 гг. дата появления первичных ледовых явлений в среднем приходилась на 25 октября, в период с 1981 по 2019 гг. дата образования первичных ледовых явлений сместилась на 6 дней позднее – в среднем 31 октября.

В с. Ярцево в период с 1950 по 1980 гг. дата появления первичных ледовых явлений в среднем приходилась на 23 октября, в период с 1981 по 2019 гг. дата образования первичных ледовых явлений сместилась на 2 дня позднее – в среднем 25 октября.

В п. Бахта в период с 1950 по 1980 гг. дата появления первичных ледовых явлений в среднем приходилась на 17 октября, в период с 1981 по 2019 гг. дата образования первичных ледовых явлений сместилась на 1 день позднее – в среднем 18 октября.

В с. Верещагино в период с 1950 по 1980 гг. дата появления первичных ледовых явлений в среднем приходилась на 15 октября, в период с 1981 по 2019 гг. дата образования первичных ледовых явлений сместилась на 2 дня позднее – в среднем 17 октября.

В д. Селиваниха в период с 1950 по 1980 гг. дата появления первичных ледовых явлений в среднем приходилась на 13 октября, в период с 1981 по 2019 гг. дата образования первичных ледовых явлений сместилась на 4 дня позднее – в среднем 17 октября.

В п. Курейка в период с 1950 по 1980 гг. дата появления первичных ледовых явлений в среднем приходилась на 17 октября, в период с 1981 по 2019 гг. дата образования первичных ледовых явлений сместилась на 1 день позднее – в среднем 18 октября.

В г. Игарка в оба периода с 1950 по 1980 гг. и с 1981 по 2019 гг. дата появления первичных ледовых явлений в среднем приходилась на 16 октября.

В д. Потапово в период с 1950 по 1980 гг. дата появления первичных ледовых явлений в среднем приходилась на 15 октября, в период с 1981 по 2019 гг. дата образования первичных ледовых явлений сместилась на 2 дня позднее – в среднем 17 октября.

В г. Дудинка в период с 1950 по 1980 гг. дата появления первичных ледовых явлений в среднем приходилась на 17 октября, в период с 1981 по 2019 гг. дата образования первичных ледовых явлений сместилась на 1 день позднее – в среднем 18 октября.

В с. Караул в период с 1950 по 1980 гг. дата появления первичных ледовых явлений в среднем приходилась на 11 октября, в период с 1981 по 2019 гг. дата образования первичных ледовых явлений сместилась на 5 дней позднее – в среднем 16 октября.

Как и для верхнего и среднего течения рассматриваемого региона, при проведении анализа среднемноголетней температуры воздуха было выявлено её статистически значимое увеличение на $1,9^{\circ}\text{C}$ для нижнего течения. Даты образования первичных ледовых явлений сместились на более поздние сроки. Следует вывести из полученных результатов, что при увеличении температуры воздуха с 1981 года образование ледовых явлений в среднем течении теперь происходит позднее, в среднем на 2 дня для 11 гидрологических постов, относящихся к данному району.

Смещение сроков образования первичных ледовых явлений в исследуемом регионе на более поздние влечет за собой изменение сроков наступления и окончания ледостава, а также сроков вскрытия реки – все эти даты наступают позже, чем во время периода 1950-1980 гг. Подробнее это будет рассмотрено в следующих пунктах данной главы.

3.3. Ледовый режим в период ледостава

Наступление ледостава характеризуется (Ресурсы поверхностных вод..., 1973) неравномерностью его распространения по длине водотока, вследствие образования ледяных перемычек, между которыми образуется неподвижный ледяной покров. Подобные этому факторы обуславливают различную продолжительность подготовительного периода при замерзании рек. Подготовительный период при замерзании рек по всей длине Енисея колеблется от 22 до 35-40 дней. При наступлении ледостава повышение уровня воды является характерным явлением на реках. Следует отметить, что на Верхнем и Среднем Енисее подъем уровня воды достигает 2-4 м, у г. Игарки и ниже не превышает 0,5 м.

На Енисее ледостав распространяется от низовий вверх по реке, с севера на юг. Прежде всего сковывается участок нижнего течения реки – от устья до г. Игарки; обычно это происходит в период с 23 по 25 октября, то есть немного раньше, чем на Енисейском заливе (26-31 октября). На этом участке (протяженность 700 км) ледостав прерывается многочисленными и обширными

полюньями, которые сохраняются в течение 5-15 дней после начала ледостава. В некоторые годы наблюдается вторичный ледоход, возникающий после разрушения ледяного покрова от нагонных явлений (в это время штормовые западные ветры вызывают подъем уровней воды) и от взламывания льда морскими или речными судами.

Из г. Игарки происходит продвижение кромки ледостава вверх по реке в зависимости от состояния погоды. Начало ледостава у с. Курейки приходится в среднем на 27 октября и у с. Селиванихи – на 2-3 ноября. От с. Селиванихи до устья р. Подкаменной Тунгуски граница ледостава продвигается за 15 дней (3-18 ноября) со средней скоростью около 40 км в сутки. При движении кромки ледостава вверх по течению скорость его перемещения снижается из-за уменьшения количества льда, которое поступает в русло Енисея от его притоков и ледяной перемычки, возникающей на участке в 26-30 км выше устья Подкаменной Тунгуски. В этом районе в начале ледостава наблюдаются зажоры. В нижнее течение Енисея поступление льда происходит с Нижней Ангары и Среднего Енисея. Однако, в начале ноября этот процесс приостанавливается ввиду того, что река сковывается льдом (перемычки и ледостав) на новых участках: на Ангаре у с. Рыбного – 4 ноября, в 8 км ниже с Атаманово – 10 ноября, а общий фронт ледостава в пределах нижнего течения располагается в районе селений Ворогово-Ярцево.

На участке Енисея у с. Подсинее в среднем 13 ноября образуется ледоставная перемычка, выше которой кромка ледостава распространяется вверх по реке и подходит к с. Означенному в среднем 18 ноября.

На Верхнем Енисее (с. Усть-Уса, г. Кызыл) и на Большом Енисее ледостав устанавливается 18-25 ноября.

Таким образом, формирование ледостава на реке происходит в течение 30-40 дней.

Толщина льда. Максимальная толщина льда на Верхнем Енисее достигает 150-200 см. Большое влияние на интенсивность нарастания толщины льда в течение зимы оказывают термический режим и характер выпадения осадков

(снег). На ледяном покрове Енисея от г. Кызыл до пос. Базаиха снег почти отсутствует (5-10 см) в течение всей зимы. Устойчивый снежный покров появляется на реке лишь ниже с. Павлощины и его мощность постепенно возрастает по длине реки, составляя к концу зимы 30-50 см.

Шуга, зажоры, наледи. Наиболее распространенная форма плавучего льда является шуга. Интенсивное перемешивание воды способствует в холодное время года переохлаждению потока и образованию шуги. На Енисее в период начальной стадии зимы наблюдается массовое образование донного и внутриводного льда, обуславливающее интенсивные и продолжительные шугоходы.

Изучение причин образования донного и внутриводного льда имеет большое научное и практическое значения, особенно в местах строительства или эксплуатации действующих гидроэлектростанций.

Интенсивность шугохода (ледохода) бывает самая разнообразная и зависит от продолжительности ледообразовательного процесса и колебаний температуры воздуха, а также от местных особенностей русла. В сужениях русла густота шугохода (ледохода) увеличивается, а в расширенных участках уменьшается. Ниже ледяных перемычек, обычно наблюдается редкий шугоход (ледоход).

При образовании ледостава и возникновении зажоров уровни воды резко поднимаются. На Верхнем и Среднем Енисее, а также на больших притоках Енисея подъем воды происходит на 2-4 м, на средних реках – на 0,4-0,5 м. При особенно высоких подъемах вода иногда местами выходит из берегов, затопляя прибрежную местность.

После установления ледостава на Енисее шуга всегда появляется на участке от г. Кызыла до устья Подкаменной Тунгуски, причём наиболее мощные её скопления наблюдается на Верхнем Енисее. Слой шуги постепенно уменьшается вниз по течению реки, составляя к концу ноября у г. Кызыла в среднем 1,3 м, у с. Никитино 0,6 м, у пос. Базаихи 0,3 м. Русло Енисея остается зашугованным ежегодно до конца января, в отдельных пунктах шуга иногда

держится до конца зимнего сезона, но большей частью она полностью рассасывается или остается в небольшом количестве. В середине зимы в районе г. Красноярска шуга забивает живое сечение русла Енисея на 30-60 %. Ниже устья Подкаменной Тунгуски в русле реки в течение всей зимы шуга почти нигде не наблюдается.

На основе базы данных гидрометеорологических характеристик реки Енисей были выполнены расчёты дат образования ледостава и последнего дня ледостава, а также продолжительность ледостава в русле реки. При проведении расчётов использовалось разделение водотока на три характерных участка, как и при расчёте среднемноголетних значений температуры исследуемого района.

На рисунке 3.4 представлена гистограмма распределения дат установления ледостава в русле верхнего течения Енисея.

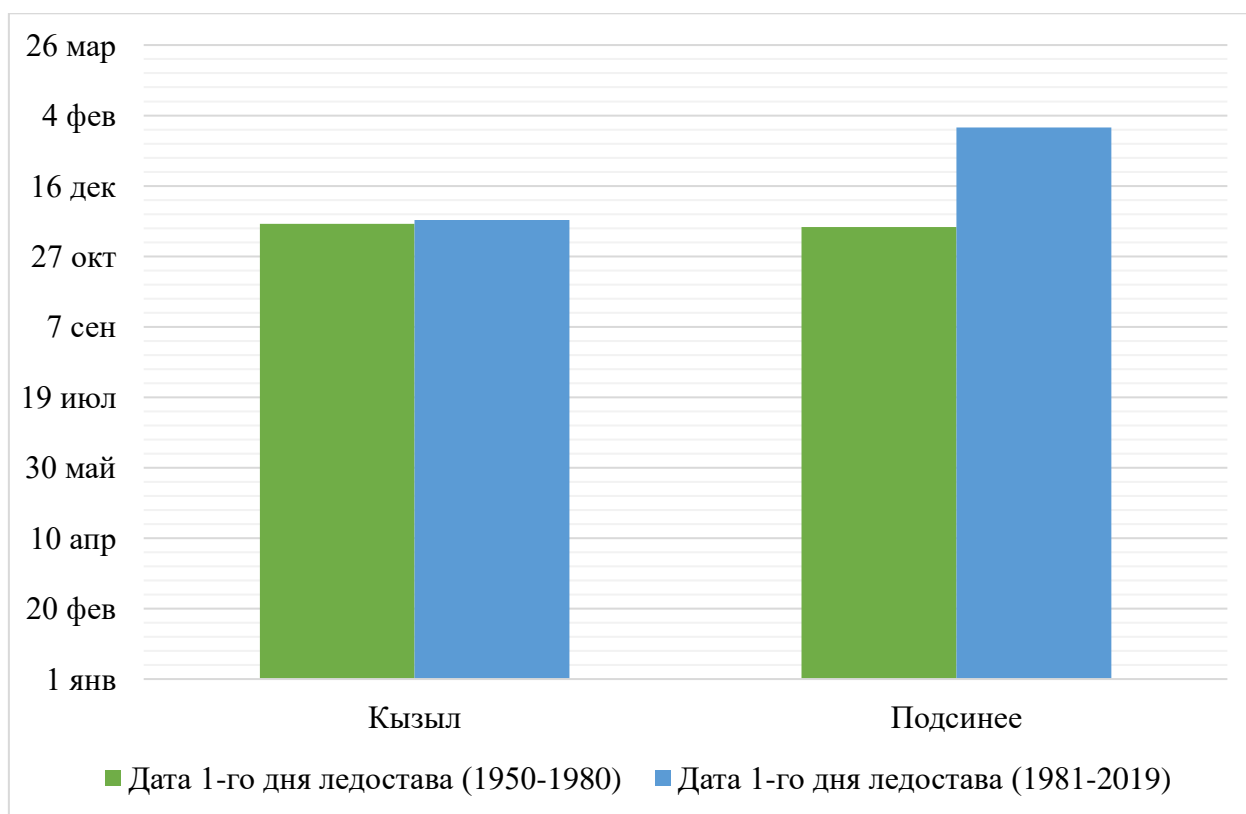


Рисунок 3.4. Даты установления ледостава в верхнем течении Енисея (1950-2019)

В г. Кызыл в период с 1950 по 1980 гг. дата установления ледостава в среднем приходилась на 19 ноября, в период с 1981 по 2019 гг. дата установления ледостава сместилась на 2 дня позднее – в среднем 21 ноября.

В с. Подсинее в период с 1950 по 1980 гг. дата установления ледостава в среднем приходилась на 16 ноября, в период с 1981 по 2019 гг. дата установления ледостава сместилась на 2 месяца позднее – в среднем 26 января.

Статистически значимое увеличение температуры воздуха, выявленное в главе 2 при проведении анализа её многолетней вариации, и смещение сроков установления ледостава в верхнем течении Енисея взаимосвязано. Следует вывести, что с увеличением температуры воздуха с 1981 года установление ледостава происходит позднее в данном районе, в среднем на месяц.

На рисунке 3.5 представлена гистограмма распределения дат установления ледостава в русле среднего течения Енисея.

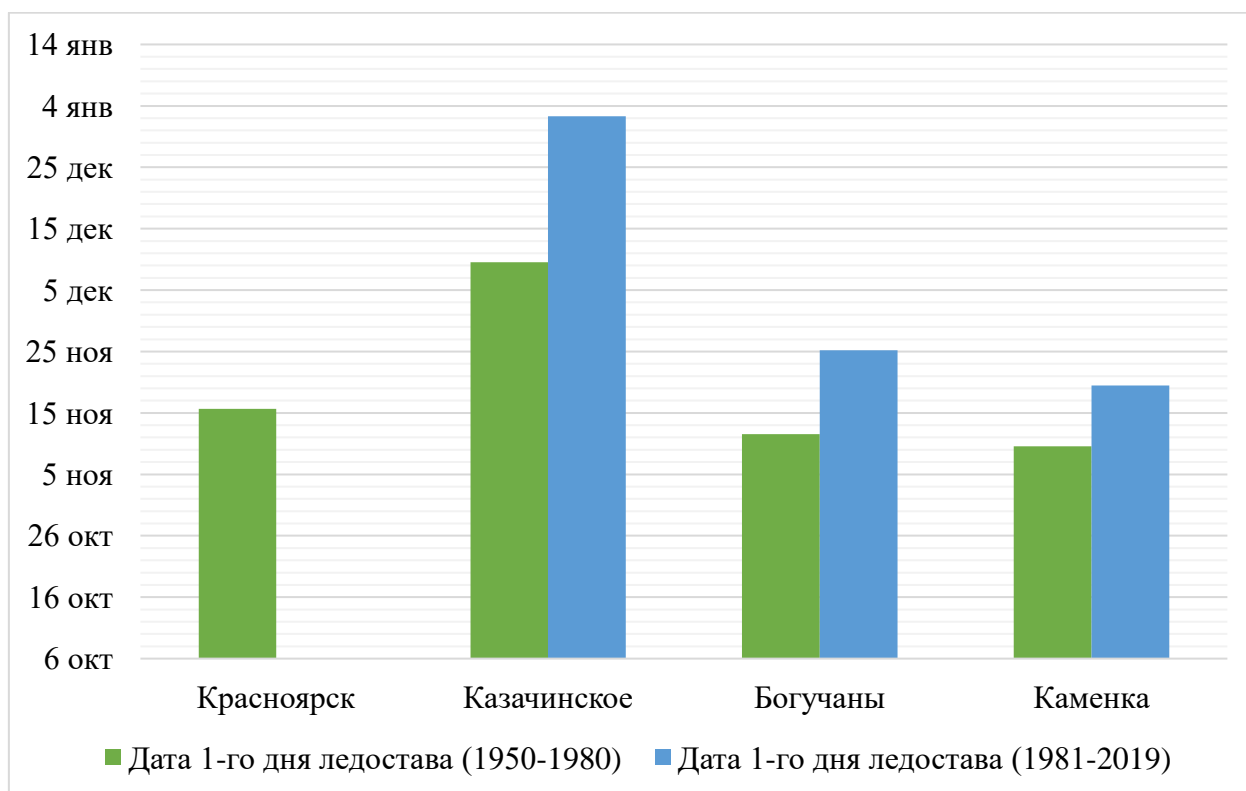


Рисунок 3.5. Даты установления ледостава в среднем течении Енисея (1950-2019)

В г. Красноярск в период с 1950 по 1980 гг. дата установления ледостава в среднем приходилась на 15 ноября, в период с 1981 по 2019 гг. дата установления

ледостава зафиксирована не была, т. к. ледостава в районе г/п г. Красноярск не наблюдалось с 1967 года.

В с. Казачинское в период с 1950 по 1980 гг. дата установления ледостава в среднем приходилась на 9 декабря, в период с 1981 по 2019 гг. дата установления ледостава сместилась на 23 дня позднее – в среднем 2 января.

В с. Богучаны в период с 1950 по 1980 гг. дата установления ледостава в среднем приходилась на 11 ноября, в период с 1981 по 2019 гг. дата установления ледостава сместилась на 14 дней позднее – в среднем 26 ноября.

В д. Каменка в период с 1950 по 1980 гг. дата установления ледостава в среднем приходилась на 9 ноября, в период с 1981 по 2019 гг. дата установления ледостава сместилась на 10 дней позднее – в среднем 19 ноября.

Статистически значимое увеличение температуры воздуха, выявленное в главе 2 при проведении анализа её многолетней вариации, и смещение сроков установления ледостава в среднем течении Енисея, как и в верхнем, взаимосвязано. Следует вывести, что с увеличением температуры воздуха с 1981 года установление ледостава происходит позднее в данном районе, в среднем на 16 дней.

На рисунке 3.6 представлена гистограмма распределения дат установления ледостава в русле нижнего течения Енисея.

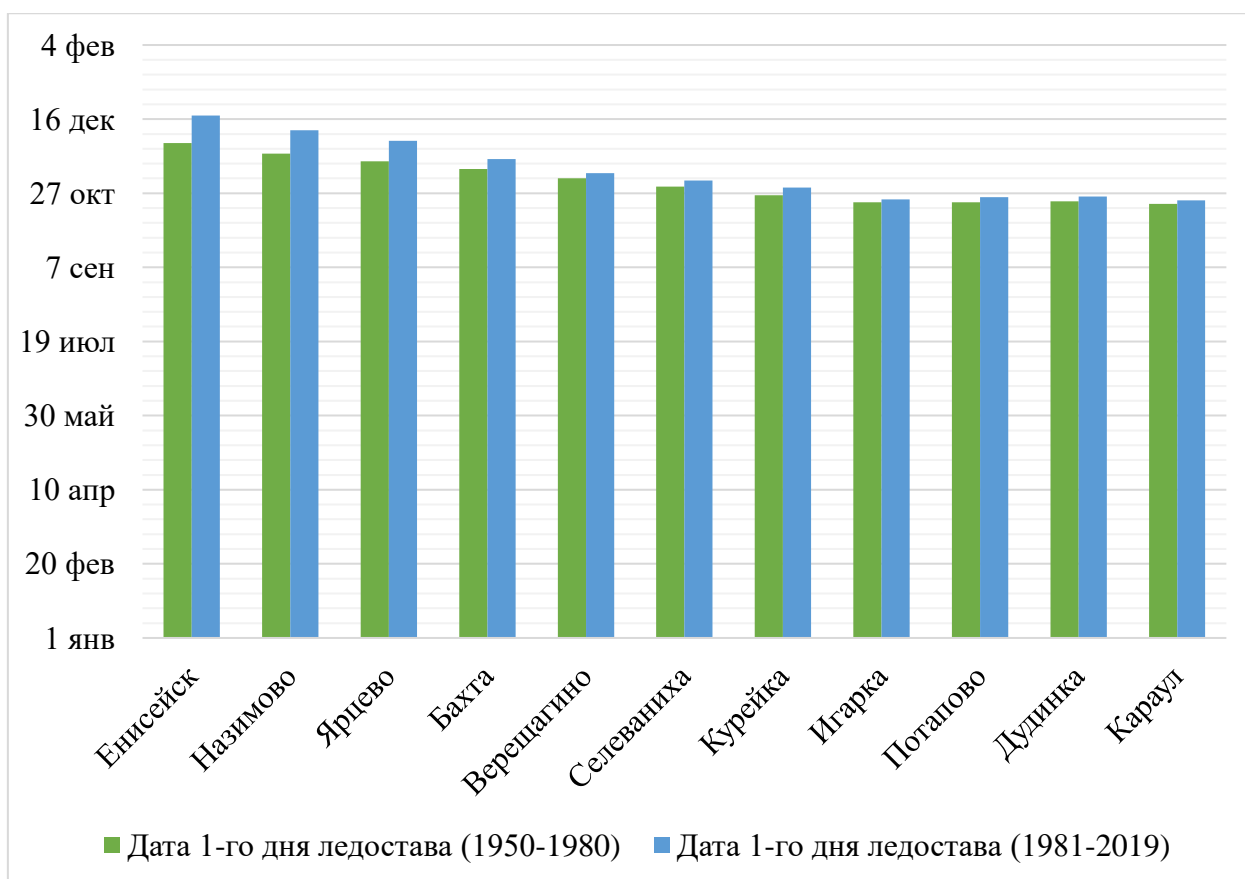


Рисунок 3.6. Даты установления ледостава в нижнем течении Енисея (1950-2019)

В г. Енисейск в период с 1950 по 1980 гг. дата установления ледостава в среднем приходилась на 29 ноября, в период с 1981 по 2019 гг. дата установления ледостава сместилась на 18 дней позднее – в среднем 18 декабря.

В д. Назимово в период с 1950 по 1980 гг. дата установления ледостава в среднем приходилась на 22 ноября, в период с 1981 по 2019 гг. дата установления ледостава сместилась на 15 дней позднее – в среднем 8 декабря.

В с. Ярцево в период с 1950 по 1980 гг. дата установления ледостава в среднем приходилась на 17 ноября, в период с 1981 по 2019 гг. дата установления ледостава сместилась на 14 дней позднее – в среднем 1 декабря.

В п. Бахта в период с 1950 по 1980 гг. дата установления ледостава в среднем приходилась на 12 ноября, в период с 1981 по 2019 гг. дата установления ледостава сместилась на 7 дней позднее – в среднем 17 ноября.

В с. Верещагино в период с 1950 по 1980 гг. дата установления ледостава в среднем приходилась на 6 ноября, в период с 1981 по 2019 гг. дата установления ледостава сместилась на 3 дня позднее – в среднем 9 ноября.

В д. Селиваниха в период с 1950 по 1980 гг. дата установления ледостава в среднем приходилась на 31 октября, в период с 1981 по 2019 гг. дата установления ледостава сместилась на 4 дня позднее – в среднем 4 ноября.

В п. Курейка в период с 1950 по 1980 гг. дата установления ледостава в среднем приходилась на 25 октября, в период с 1981 по 2019 гг. дата установления ледостава сместилась на 5 дней позднее – в среднем 30 октября.

В г. Игарка в период с 1950 по 1980 гг. дата установления ледостава в среднем приходилась на 20 октября, в период с 1981 по 2019 гг. дата установления ледостава сместилась на 2 дня позднее – в среднем на 22 октября.

В д. Потапово в период с 1950 по 1980 гг. дата установления ледостава в среднем приходилась на 20 октября, в период с 1981 по 2019 гг. дата установления ледостава сместилась на 4 дня позднее – в среднем 24 октября.

В г. Дудинка в период с 1950 по 1980 гг. дата установления ледостава в среднем приходилась на 21 октября, в период с 1981 по 2019 гг. дата установления ледостава сместилась на 3 дня позднее – в среднем 24 октября.

В с. Караул в период с 1950 по 1980 гг. дата установления ледостава в среднем приходилась на 19 октября, в период с 1981 по 2019 гг. дата установления ледостава сместилась на 3 дня позднее – в среднем 22 октября.

Статистически значимое увеличение температуры воздуха, выявленное в главе 2 при проведении анализа её многолетней вариации, и смещение сроков установления ледостава в нижнем течении Енисея, как в верхнем и среднем, взаимосвязано. Следует вывести, что с увеличением температуры воздуха с 1981 года установление ледостава происходит позднее в данном районе, в среднем на 7 дней.

На рисунке 3.7 представлена гистограмма распределения дат последнего дня ледостава в русле верхнего течения Енисея.

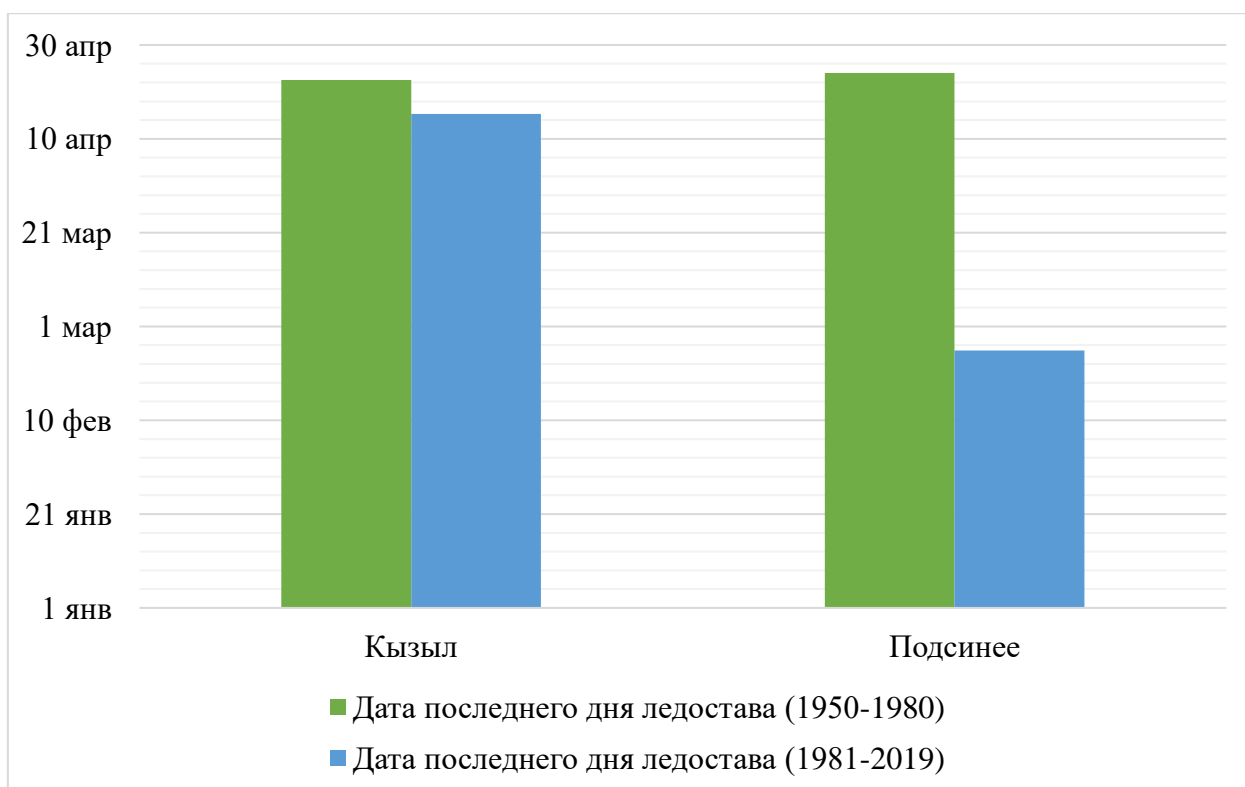


Рисунок 3.7. Дата последнего дня ледостава в верхнем течении Енисея (1950-2019)

В г. Кызыл в период с 1950 по 1980 гг. дата последнего дня ледостава в среднем приходилась на 22 апреля, в период с 1981 по 2019 гг. дата последнего дня ледостава сместилась на 7 дней раньше – в среднем 15 апреля.

В с. Подсинее в период с 1950 по 1980 гг. дата последнего дня ледостава в среднем приходилась на 24 апреля, в период с 1981 по 2019 гг. дата последнего дня ледостава сместилась на 2 месяца раньше – в среднем 24 февраля.

Как было выявлено выше, смещение сроков замерзания русла рек Енисей и Ангара, связано со статистически значимым увеличением температуры воздуха, выявленным в главе 2. Так и даты последнего дня ледостава для данного района подвержены влиянию изменяющейся температуры воздуха: с её увеличением последний день ледостава теперь наступает раньше, для верхнего течения в среднем на месяц.

На рисунке 3.8 представлена гистограмма распределения дат последнего дня ледостава в русле среднего течения Енисея.

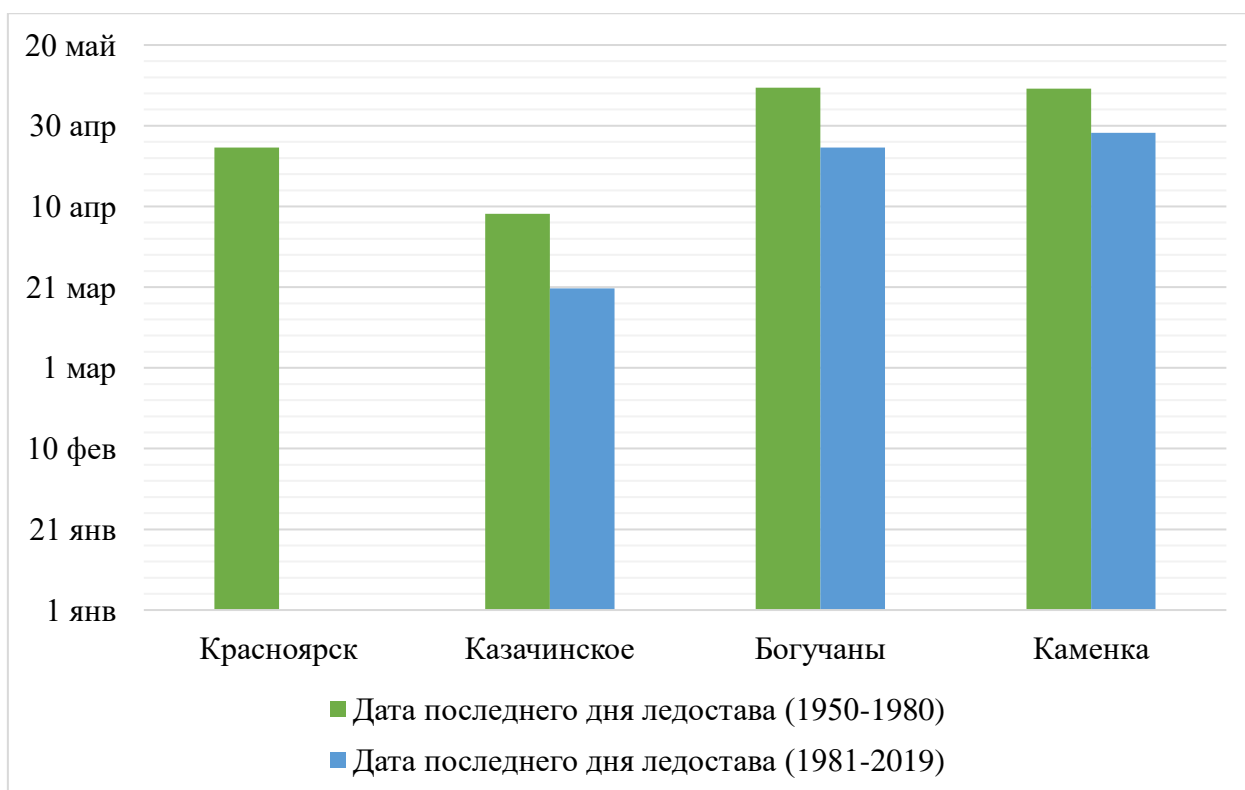


Рисунок 3.8. Дата последнего дня ледостава в среднем течении Енисея (1950-2019)

В г. Красноярск в период с 1950 по 1980 гг. дата последнего дня ледостава в среднем приходилась на 24 апреля, в период с 1981 по 2019 гг. дата последнего дня ледостава зафиксирована не была, т. к. ледостава в районе г/п г. Красноярск не наблюдалось с 1967 года.

В с. Казачинское в период с 1950 по 1980 гг. дата последнего дня ледостава в среднем приходилась на 8 апреля, в период с 1981 по 2019 гг. дата последнего дня ледостава сместилась на 18 дней раньше – в среднем 20 марта.

В с. Богучаны в период с 1950 по 1980 гг. дата последнего дня ледостава в среднем приходилась на 9 мая, в период с 1981 по 2019 гг. дата последнего дня ледостава сместилась на 14 дней раньше – в среднем 24 апреля.

В д. Каменка в период с 1950 по 1980 гг. дата последнего дня ледостава в среднем приходилась на 9 мая, в период с 1981 по 2019 гг. дата последнего дня ледостава сместилась на 10 дней раньше – в среднем 28 апреля.

Выявленное выше смещение сроков замерзания русла рек Енисей и Ангара, связано со статистически значимым увеличением температуры воздуха, как

было сказано ранее. Для среднего течения, как и для верхнего, даты последнего дня ледостава для данного района подвержены влиянию изменяющейся температуры воздуха: с её увеличением последний день ледостава теперь наступает раньше, для данного района в среднем на 14 дней.

На рисунке 3.9 представлена гистограмма распределения дат последнего дня ледостава в русле нижнего течения Енисея.

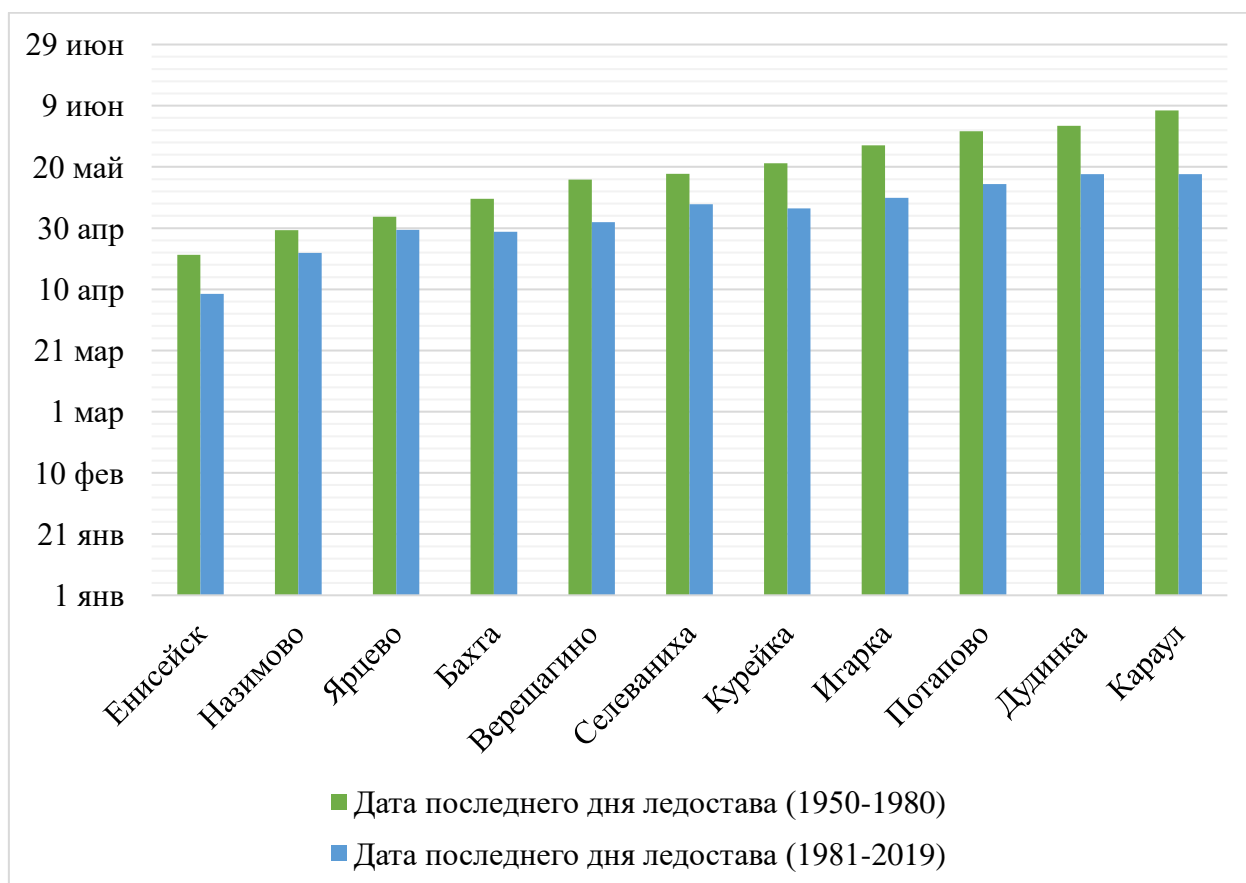


Рисунок 3.9. Дата последнего дня ледостава в нижнем течении Енисея (1950-2019)

В г. Енисейск в период с 1950 по 1980 гг. дата последнего дня ледостава ледостава в среднем приходилась на 21 апреля, в период с 1981 по 2019 гг. дата последнего дня ледостава сместилась на 12 дней раньше – в среднем 8 апреля.

В д. Назимово в период с 1950 по 1980 гг. дата последнего дня ледостава в среднем приходилась на 29 апреля, в период с 1981 по 2019 гг. дата последнего дня ледостава сместилась на 8 дней раньше – в среднем 21 апреля.

В с. Ярцево в период с 1950 по 1980 гг. дата последнего дня ледостава в среднем приходилась на 3 мая, в период с 1981 по 2019 гг. дата последнего дня ледостава сместилась на 4 дня раньше – в среднем 29 апреля.

В п. Бахта в период с 1950 по 1980 гг. дата последнего дня ледостава в среднем приходилась на 9 мая, в период с 1981 по 2019 гг. дата последнего дня ледостава сместилась на 10 дней раньше – в среднем 28 апреля.

В с. Верещагино в период с 1950 по 1980 гг. дата последнего дня ледостава в среднем приходилась на 15 мая, в период с 1981 по 2019 гг. дата последнего дня ледостава сместилась на 14 дней раньше – в среднем 1 мая.

В д. Селиваниха в период с 1950 по 1980 гг. дата последнего дня ледостава в среднем приходилась на 17 мая, в период с 1981 по 2019 гг. дата последнего дня ледостава сместилась на 10 дней раньше – в среднем 7 мая.

В п. Курейка в период с 1950 по 1980 гг. дата последнего дня ледостава в среднем приходилась на 21 мая, в период с 1981 по 2019 гг. дата последнего дня ледостава сместилась на 15 дней раньше – в среднем 6 мая.

В г. Игарка в период с 1950 по 1980 гг. дата последнего дня ледостава в среднем приходилась на 27 мая, в период с 1981 по 2019 гг. дата последнего дня ледостава сместилась на 17 дней раньше – в среднем на 9 мая.

В д. Потапово в период с 1950 по 1980 гг. дата последнего дня ледостава в среднем приходилась на 31 мая, в период с 1981 по 2019 гг. дата последнего дня ледостава сместилась на 17 дней раньше – в среднем 14 мая.

В г. Дудинка в период с 1950 по 1980 гг. дата последнего дня ледостава в среднем приходилась на 2 июня, в период с 1981 по 2019 гг. дата последнего дня ледостава сместилась на 15 дней раньше – в среднем 17 мая.

В с. Караул в период с 1950 по 1980 гг. дата последнего дня ледостава в среднем приходилась на 7 июня, в период с 1981 по 2019 гг. дата последнего дня ледостава сместилась на 20 дней раньше – в среднем 17 мая.

Выявленное выше смещение сроков замерзания русла рек Енисей и Ангара, связано со статистически значимым увеличением температуры воздуха, как было сказано ранее. Для нижнего течения, как для верхнего и среднего, даты

последнего дня ледостава для данного района подвержены влиянию изменяющейся температуры воздуха: с её увеличением последний день ледостава теперь наступает раньше, для данного района в среднем на 13 дней.

На рисунке 3.10 представлена гистограмма распределения продолжительности ледостава в русле верхнего течения Енисея.

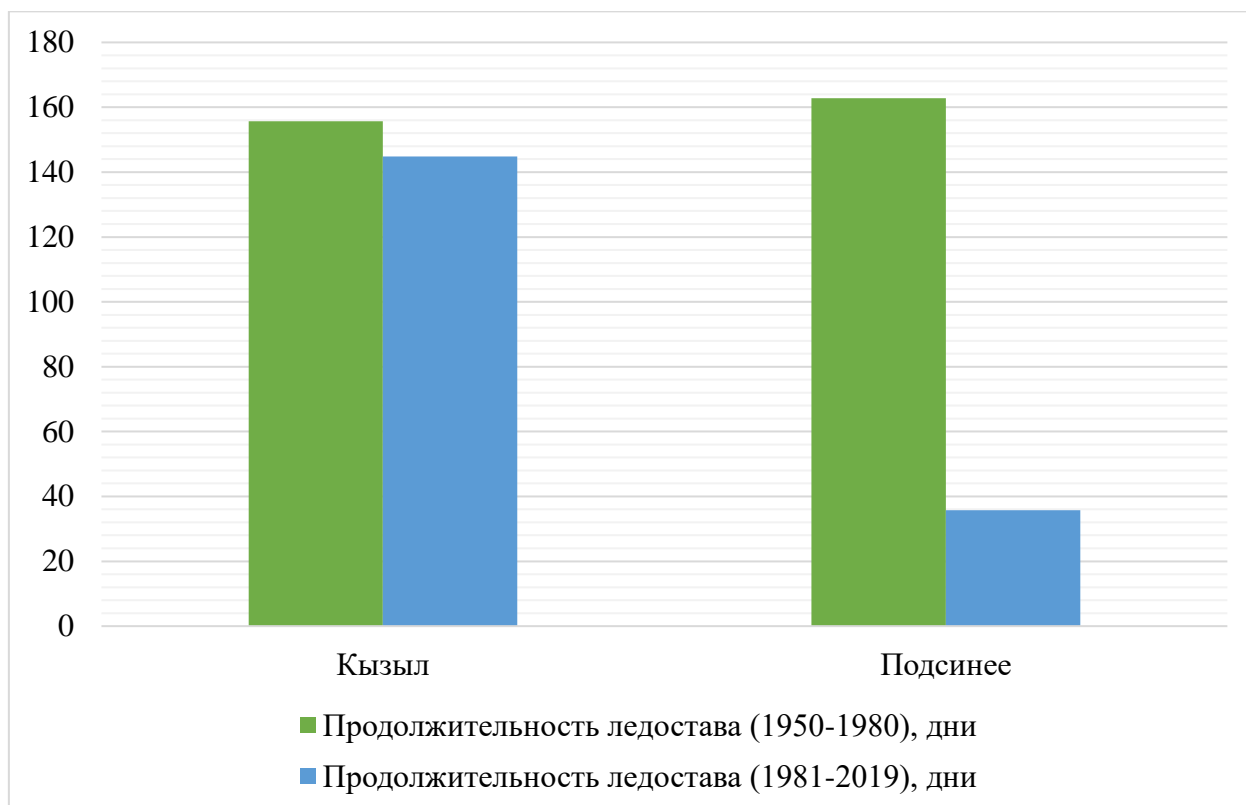


Рисунок 3.10. Продолжительность ледостава в верхнем течении Енисея (1950-2019)

В г. Кызыл в период с 1950 по 1980 гг. продолжительность ледостава составляла в среднем 156 дней, в период с 1981 по 2019 гг. продолжительность ледостава сократилась на 11 дней – в среднем 145 дней.

В с. Подсинее в период с 1950 по 1980 гг. продолжительность ледостава составляла в среднем 163 дней, в период с 1981 по 2019 гг. продолжительность ледостава сократилась на 127 дней – в среднем 36 дней.

Влияние статистически значимого увеличения температуры воздуха сказывается и на продолжительность ледостава в районе верхнего течения исследуемого региона: с 1981 года происходит уменьшение продолжительности

наблюдения устойчивого ледового покрова на реке, в среднем разница составила чуть больше 2 месяцев.

На рисунке 3.11 представлена гистограмма распределения продолжительности ледостава в русле среднего течения Енисея.

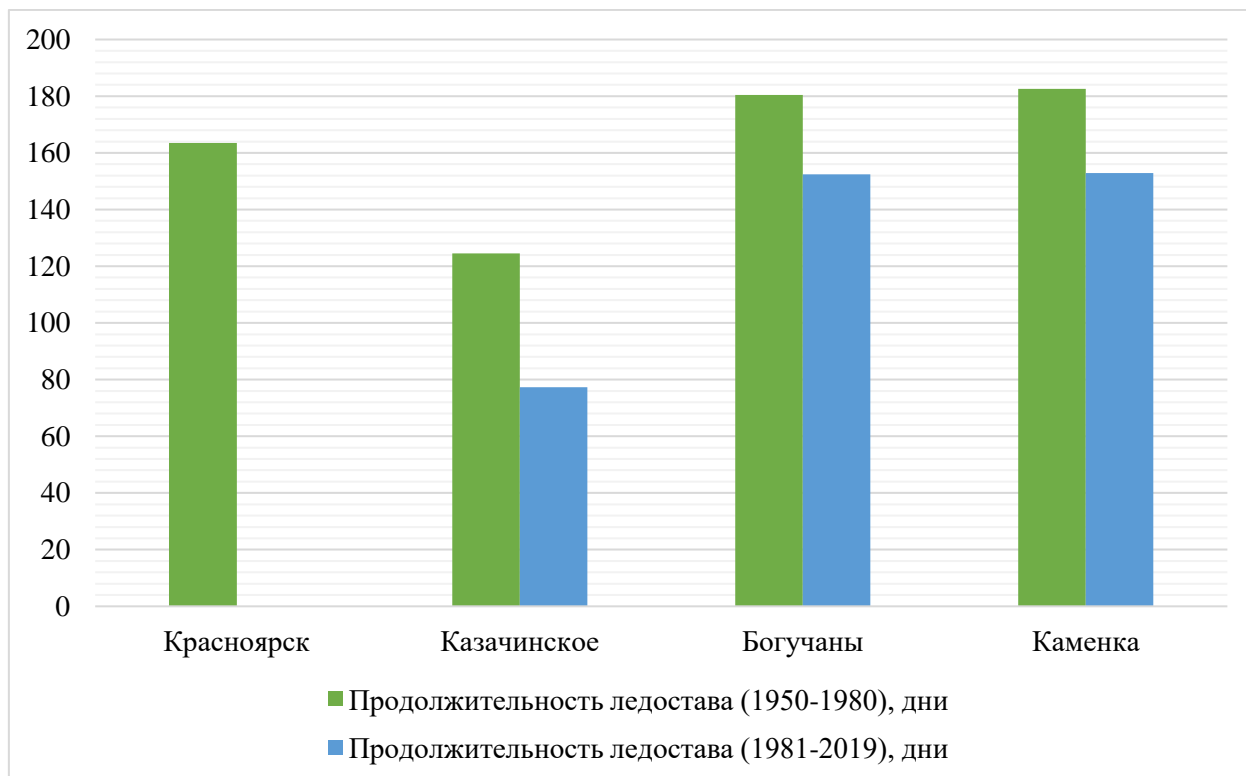


Рисунок 3.11. Продолжительность ледостава в среднем течении Енисея (1950-2019)

В г. Красноярск в период с 1950 по 1980 гг. продолжительность ледостава составляла в среднем 164 дня, в период с 1981 по 2019 гг. продолжительность ледостава зафиксирована не была, т. к. ледостава в районе г/п г. Красноярск не наблюдалось с 1967 года.

В с. Казачинское в период с 1950 по 1980 гг. продолжительность ледостава составляла в среднем 125 дней, в период с 1981 по 2019 гг. продолжительность ледостава сократилась на 47 дней – в среднем 77 дней.

В с. Богучаны в период с 1950 по 1980 гг. продолжительность ледостава составляла в среднем 180 дней, в период с 1981 по 2019 гг. продолжительность ледостава сократилась на 28 дней – в среднем 152 дня.

В д. Каменка в период с 1950 по 1980 гг. продолжительность ледостава составляла в среднем 183 дня, в период с 1981 по 2019 гг. продолжительность ледостава сократилась на 30 дней – в среднем 153 дня.

Статистически значимое увеличение температуры воздуха характерно влияет и на продолжительность ледостава в районе среднего течения исследуемого региона: с 1981 года происходит уменьшение продолжительности наблюдения устойчивого ледового покрова на реке, в среднем разница составила 24 дня.

На рисунке 3.12 представлена гистограмма распределения продолжительности ледостава в русле нижнего течения Енисея.

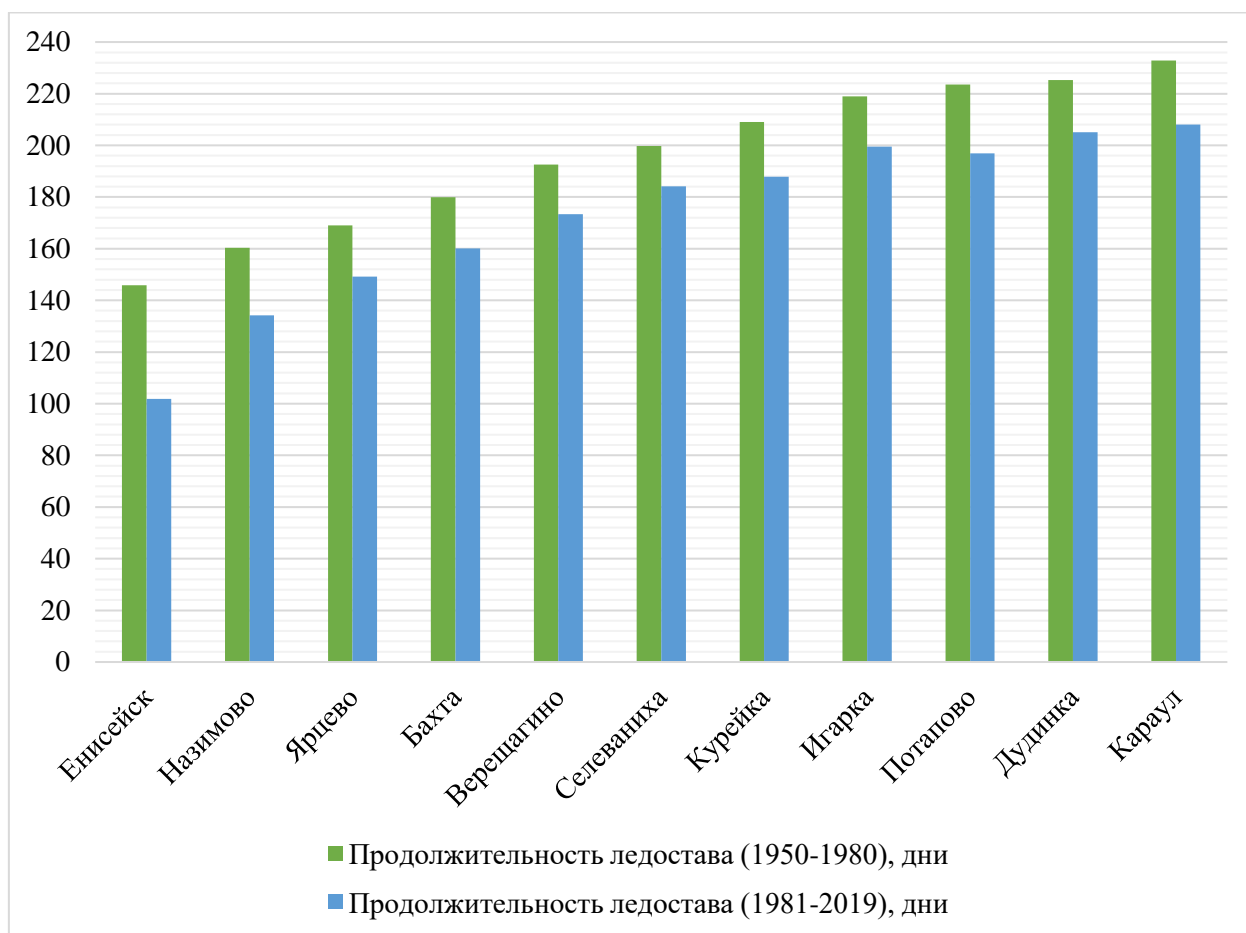


Рисунок 3.12. Продолжительность ледостава в нижнем течении Енисея (1950-2019)

В г. Енисейск в период с 1950 по 1980 гг. продолжительность ледостава составляла в среднем 146 дней, в период с 1981 по 2019 гг. продолжительность ледостава сократилась на 44 дня – в среднем 102 дня.

В д. Назимово в период с 1950 по 1980 гг. продолжительность ледостава составляла в среднем 160 дней, в период с 1981 по 2019 гг. продолжительность ледостава сократилась на 26 дней – в среднем 134 дня.

В с. Ярцево в период с 1950 по 1980 гг. продолжительность ледостава составляла в среднем 169 дней, в период с 1981 по 2019 гг. продолжительность ледостава сократилась на 20 дней – в среднем 149 дней.

В п. Бахта в период с 1950 по 1980 гг. продолжительность ледостава составляла в среднем 180 дней, в период с 1981 по 2019 гг. продолжительность ледостава сократилась на 20 дней – в среднем 160 дней.

В с. Верещагино в период с 1950 по 1980 гг. продолжительность ледостава составляла в среднем 193 дня, в период с 1981 по 2019 гг. продолжительность ледостава сократилась на 19 дней – в среднем 173 дня.

В д. Селиваниха в период с 1950 по 1980 гг. продолжительность ледостава составляла в среднем 200 дней, в период с 1981 по 2019 гг. продолжительность ледостава сократилась на 16 дней – в среднем 184 дня.

В п. Курейка в период с 1950 по 1980 гг. продолжительность ледостава составляла в среднем 209 дней, в период с 1981 по 2019 гг. продолжительность ледостава сократилась на 21 день – в среднем 188 дней.

В г. Игарка в период с 1950 по 1980 гг. продолжительность ледостава составляла в среднем 219 дней, в период с 1981 по 2019 гг. продолжительность ледостава сократилась на 19 дней – в среднем 200 дней.

В д. Потапово в период с 1950 по 1980 гг. продолжительность ледостава составляла в среднем 224 дня, в период с 1981 по 2019 гг. продолжительность ледостава сократилась на 27 дней – в среднем 197 дней.

В г. Дудинка в период с 1950 по 1980 гг. продолжительность ледостава составляла в среднем 225 дней, в период с 1981 по 2019 гг. продолжительность ледостава сократилась на 20 дней – в среднем 205 дней.

В с. Караул в период с 1950 по 1980 гг. продолжительность ледостава составляла в среднем 233 дня, в период с 1981 по 2019 гг. продолжительность ледостава сократилась на 25 дней – в среднем 208 дней.

Статистически значимое увеличение температуры воздуха характерно влияет и на продолжительность ледостава в районе нижнего течения исследуемого региона: с 1981 года происходит уменьшение продолжительности наблюдения устойчивого ледового покрова на реке, в среднем разница составила 22 дня.

Ледовый режим в период ледостава, как было выведено выше, подвержен влиянию изменяющихся в современное время климатических условий, а именно увеличению среднемноголетней температуры воздуха в исследуемом регионе.

3.4. Ледовый режим в период вскрытия

На реках, расположенных на изучаемой территории (Ресурсы поверхностных вод..., 1973), в частности на Енисее, процесс вскрытия происходит в результате теплового и механического факторов. Вскрытию, как и замерзанию рек, предшествует подготовительный период, длительность которого исчисляется промежутком времени от даты перехода температуры воздуха через 0°C к устойчивым положительным температурам до начала вскрытия реки, обычно проявляющееся в активной фазе – начале весеннего ледохода.

Для верхнего течения Енисея, где основную роль играет тепловой фактор, на продолжительность подготовительного периода также влияют физические закономерности этого процесса. С другой стороны, для нижнего течения подготовительный период достаточно короткий ввиду влияния механического фактора по большей части. Также следует учитывать, что в район нижнего течения Енисея приходят воды, которые уже успели нагреться до 4-5°C в южных широтах, они оказывают дополнительное воздействие на таяние льда и ослабление прочности ледяного покрова, тем самым помогая механическому фактору воздействия. Существенно влияют заторы льда при вскрытии Енисея в

нижнем течении, заторы являются результатом сложного взаимодействия силы потока и сопротивления льда.

Одним из первых признаков приближающегося вскрытия рек является появление на льду талой воды (вода на льду), образующаяся вскоре после перехода температуры воздуха через 0°C к устойчивым положительным значениям. Талые воды, количество которых увеличивается, заполняют углубления на льду и затем стекают по уклону в виде потоков, усиливающих от поступления новых масс воды (вода течет поверх льда). Вода, текущая по льду, производит разрушительную работу, часть этой воды проникает под лёд, часть продолжает скатываться по жёлобу, а часть течет вдоль берегов, образуя промоины и закраины. Промоины, постепенно увеличивающиеся в размерах, соединяются с закраинами (полосы «чистой» воды у берегов) и образуют разводья – участки, свободные ото льда.

Проникшая под ледяной покров вода повышает уровень в реке, от чего лёд вспучивается, приподнимается и разрушается. В итоге это приводит к отрыванию массы льда от берегов и её всплытию (лёд поднялся). В дальнейшем процесс разрушения принимает более активный характер: ледяные поля смещаются, разламываются, большие льдины дробятся на мелкие.

Одним из наиболее характерных признаков близкого вскрытия реки является подвижка льда. Первая подвижка льда на Енисее в среднем наблюдается за 2-4 дня до вскрытия. Однако в отдельные годы имеют место случаи, когда это явления происходит за 10-17 дней. Например, в 1967 году у г. Игарки. Последняя подвижка чаще всего происходит накануне ледохода, за 1-2 дня до его наступления. Часто бывает, что подвижки следуют одна за другой в течение 2-3 дней подряд. Например, в 1953 году у г. Игарки это наблюдалось 5 дней подряд с 25 по 29 мая.

Как правило, подвижка льда происходит при уже начавшемся подъеме воды в реках. Подвижка льда, наблюдавшаяся задолго до вскрытия реки и наступления ледохода, – редкое явление. Это явление обычно отмечается в

период ранней временной оттепели, сменившейся резко выраженной волной похолодания.

После 1-2 дней с подвижками обычно в течение некоторого времени лёд продолжает находиться в стабильном состоянии. Однако после нескольких подвижек, нередко и после одной, он уже утрачивает свою прочность. Когда водность потока увеличивается до того, что лёд может перемещаться по руслу, происходит вскрытие и начинается весенний ледоход.

На Енисее выделяются два типа подвижек по причинам механизма. Первый тип характеризуется тем, что подвижка непосредственно предшествует вскрытию реки, и место подвижки льда располагается близко кромки участка весеннего ледохода. В результате подвижки отмечается местный подъем уровня воды, что способствует последовательности процесса вскрытия. На участках реки выше места подвижки льда может наблюдаться ледоход. Этот тип подвижки наиболее характерен для нижнего течения.

Подвижки второго типа обуславливаются неоднородностью состояния льда по длине реки накануне её вскрытия. На Среднем Енисее в районе селений Новоселово, Даурское, Коркино ежегодно наблюдаются подвижки льда второго типа за 3-10 дней до наступления ледохода, что указывает на неоднородность ледяного покрова в этих местах. Неоднородность прежде всего зависит от условий замерзания и режима скоростей течения воды. условия замерзания определяют первичное состояние ледяного покрова и величину подледной зашугованности русла. В местах, где раньше всего наступает ледостав, создаются условия для уплотнения льда и усиления зашугованности русла. Различия в условиях замерзания и степени зашугованности русла оказывают существенное влияние на процесс нарастания льда в течение зимы и на ослабление ледяного покрова весной.

Процесс стаивания льда весной зависит от температуры воды и скорости её течения. Различия в распределении толщины льда перед вскрытием напрямую зависят от интенсивности процесса стаивания на различных участках русла реки.

На Енисее вскрытие русла происходит весьма неравномерно по всей его длине. Разность дат вскрытия реки у г. Кызыл и в низовьях превышает 40 дней. Ввиду уменьшения скорости перемещения фронта вскрытия от верхнего течения до Нижнего Енисея процесс вскрытия в низовья идёт в 1,5-2 раза медленнее, чем на верхних участках.

Ранее всего вскрытие происходит на Енисее (24-26 апреля) на участке между селениями Абакано-Перевоз и Новоселово, на 2-3 дня позднее он вскрывается у г. Красноярска. Вскрытие р. Кан (24 апреля) обуславливает ледоход на Енисее у селений Павловщина (25 апреля) и Казачинского (28 апреля). Вскрытие Енисея на участке от устья р. Абакана до устья Ангары происходит в течение 5 дней.

Когда весенний ледоход начинается в районе устья Ангары, отмечается вскрытие Верхнего Енисея (28-30 апреля) и его составляющих – Большого Енисея и Малого Енисея (29, 30 апреля).

Вскрытие Енисея на севере, от устья Ангары до Осиновского порога, происходит в течение первой декады мая. На участке от д. Подкаменной Тунгуски до с. Туруханска ледоход в среднем отмечается с 9 по 19 мая.

На участке Енисея от с. Селиванихи до г. Игарки вскрытие происходит в среднем с 19 по 29 мая, здесь скорость продвижения северной границы ледохода составляет около 25 км в сутки и минимальна для Енисея. Минимально значение этой скорости отмечается ввиду уменьшения уклона реки и увеличения толщины льда на 30-40 см по сравнению с участками, расположенными выше. От г. Игарки до с. Усть-Порт скорость движения фронта вскрытия возрастает до 42 км в сутки. В некоторые годы отмечается вскрытие, происходящее значительно быстрее. В 1960 году северная граница ледохода на участке от г. Игарки до с. Усть-Порт переместилась за 3 дня (30 мая-2 июня), т. е. в 3-4 раза быстрее обычного. Причиной быстрого взламывания и разрушения льда на этом участке послужило наступление высокой температуры воздуха в конце мая. На данном участке вскрытие произошло на 5-6 дней раньше средних сроков, на участках выше – на 4-5 дней позднее. Это явление было зафиксировано впервые с 1920-х годов.

Весной 1967 года вскрытие Енисея от д. Подкаменной Тунгуски до с. Селиванихи произошло с 28 апреля по 2 мая, т. е. на 12-17 суток раньше средних сроков, причиной этому послужило более раннее, чем обычно (26 апреля-2 мая) вскрытие северных притоков Енисея. Однако при этом возникла волна половодья, которая не смогла полностью взломать лёд на Енисее, и северная граница ледохода остановилась между с. Курейка и г. Игарка, ниже ледостав нарушен не был в течение последующих 19 дней. Ледоход ниже г. Игарки наблюдался в обычные сроки (27 мая-9 июня).

Процесс вскрытия и ледоход протекают по-разному по длине Енисея. Существенную роль играют следующие факторы: продолжительность подготовительного периода, высота подъема уровня воды при вскрытии над зимним наинизшим его положением и толщина льда к концу подготовительного периода. Роль механического фактора при вскрытии тем больше, чем короче подготовительный период на реке.

По условиям прохождения ледохода Енисей делится на три характерных участка – верхний, средний и нижний. На верхнем участке от г. Кызыла до г. Красноярска – река вскрывается под воздействием теплового фактора, механический фактор имеет второстепенное значение. Подготовительный период на этом участке составляет в среднем 21 день, более продолжителен, чем на ниже расположенных участках. Высота подъема уровня составляет 2-4,5 м.

На среднем участке – от г. Красноярска до д. Подкаменной Тунгуски – продолжительность переходного периода уменьшается до 13 дней, а роль механического фактора усиливается, этому способствует значительная высота подъема уровня воды и увеличившаяся водность потока. Гребень половодья проходит позднее разрушения ледяного покрова.

На нижнем участке реки велика роль механического фактора вскрытия реки, которое сопровождается высокими подъемами уровня воды и заторами льда. Подготовительный период на этом участке – наиболее короткий, чем на верхнем и среднем участке реки.

После строительства Красноярской ГЭС ледовый режим реки в значительной степени изменился.

Верхний Енисей очищается ото льда в первой декаде мая, в среднем течении – на 15-20 дней позднее, в нижнем – в конце первой-начале второй декады июня.

Значительное количество льда при подвижках и во время ледохода нагромождается на берегах, то приводит к частичному разрушению: иногда весной повреждаются строения, оказавшиеся в опасной зоне.

Заторы льда и условия их образования. Возникновение заторов льда при вскрытии рек (Попов, 1979) – явление широко распространенное. Особенно часты они на реках, вскрытие которых происходит главным образом под воздействием механического фактора, и в частности, на реках, текущих с юга на север.

Местами образования заторов льда чаще всего являются крутые излучины рек, мелкие перекаты, участки русла около островов и участки уменьшения продольного уклона потока. Последнее условие особенно ярко проявляется в зонах выклинивания подпора водохранилищ и на устьевых участках впадающих в море рек. Большую роль в образовании заторов играют искусственные стеснения русел (мосты и оградительные дамбы).

Размеры заторов и вызываемый ими подпор уровня воды зависит от ряда гидрометеорологических факторов. Главными из них являются:

- a) наличие ледостава ниже вскрывшегося участка реки;
- b) большая толщина и прочность льда;
- c) интенсивный подъем уровня воды, обеспечивающий одновременное вскрытие большого участка реки;
- d) состояние погоды при образовании затора.

Похолодание до отрицательных значений температуры воздуха содействует усилению заторов.

Образование заторов льда при вскрытии реки весной – характерное явления для исследуемой территории. Заторам льда обычно сопутствуют бурный

ледоход, представляющий опасность для различных гидротехнических сооружений. В периоды образования заторов и загромождения русла льдом происходит резкий и значительный подъем уровня воды, в результате возникает опасность затопления населённых пунктов. Данное обстоятельство должно приниматься во внимание при проектировании и строительстве гидротехнических сооружений на реках, в том числе гидроэлектростанций.

Развитие заторных явлений на реках отличается большой динамичностью. Наиболее бурные процессы происходят в период формирования затора, на участке реки в пределах скопления битого льда перед очагом затора. Все объекты, находящиеся в этой зоне, подвергаются значительному воздействию льда. Случаи раздавливания речных судов, разрушения и повреждения причалов, мостов приурочены именно к этой активной зоне. Губительные последствия воздействия льда вместе с разливами реки дают основания относить заторы на реках к опасным природным явлениям.

Распространение заторных явлений определяется особенностями гидрологического режима рек и климатическими условиями той или иной территории. Для Енисея выделяются два основных фактора, способствующих заторности, – образование в течение зимы мощного ледяного покрова и сохранения его в таком виде к моменту вскрытия.

Заторность на Енисее (Бузин, 2015) по частоте, мощности и размерам заторных участков увеличивается от верховьев к устью реки. Наиболее мощные заторные скопления отмечаются у городов Туруханска, Игарки и Дудинки. В среднем и верхнем течении реки не уступают им по мощности отдельные заторы льда, образующиеся на зажорных участках, где заторные подъемы достигают 8-9 м.

Разрушение заторов происходит под действием влекущей сил потока воды, когда эта сила превысит силы сопротивления, удерживающие нагромождение льда. Поэтому, чем больше нагромождение льда, тем больше требуется подъем уровня воды для того, чтобы сдвинуть образовавшийся затор. Наиболее устойчивыми являются заторы в зонах выклинивания подпора водохранилищ,

особенно, если глубины на таком участке относительно невелики и нагромождение льда достигает дна. Устойчивости таких заторов содействует наличие ледостава на водохранилище.

Прогнозы образования заторов льда и подъема уровня воды представляют собой чрезвычайно сложную задачу, которая ещё в достаточной мере не решена. Основными мерами борьбы с заторами являются ледакольные и взрывные работы.

Сохранение при вскрытии рек относительно толстого и прочного ледяного покрова объясняется причинами: резким переломом от зимы к весне и быстрым нарастанием тепла в начале весны, в результате чего подготовительный период перед вскрытием относительно короткий, и преобладающим направлением течения большинства рек с юга на север.

Вскрытие Енисея и его притоков (Ангары, Средней и Нижней Тунгуски и др.) наблюдается при менее интенсивном формировании весеннего половодья. Процесс вскрытия распространяется по длине р. Енисея со скоростью в среднем около 70 км/сутки. Волна половодья, идущая по Енисею, взламывает ледяной покров, создавая подпор и тем самым, способствуя формированию заторов на нижних участках притоков (Подкаменная Тунгуска, Нижняя Тунгуска).

На основе базы данных гидрометеорологических характеристик реки Енисей были выполнены расчёты дат высшего ледоходного уровня. При проведении расчётов использовалось разделение водотока на три характерных участка, как и при расчёте среднемноголетних значений температуры исследуемого района.

На рисунке 3.13 представлена гистограмма распределения дат высшего ледоходного уровня в русле верхнего течения Енисея.

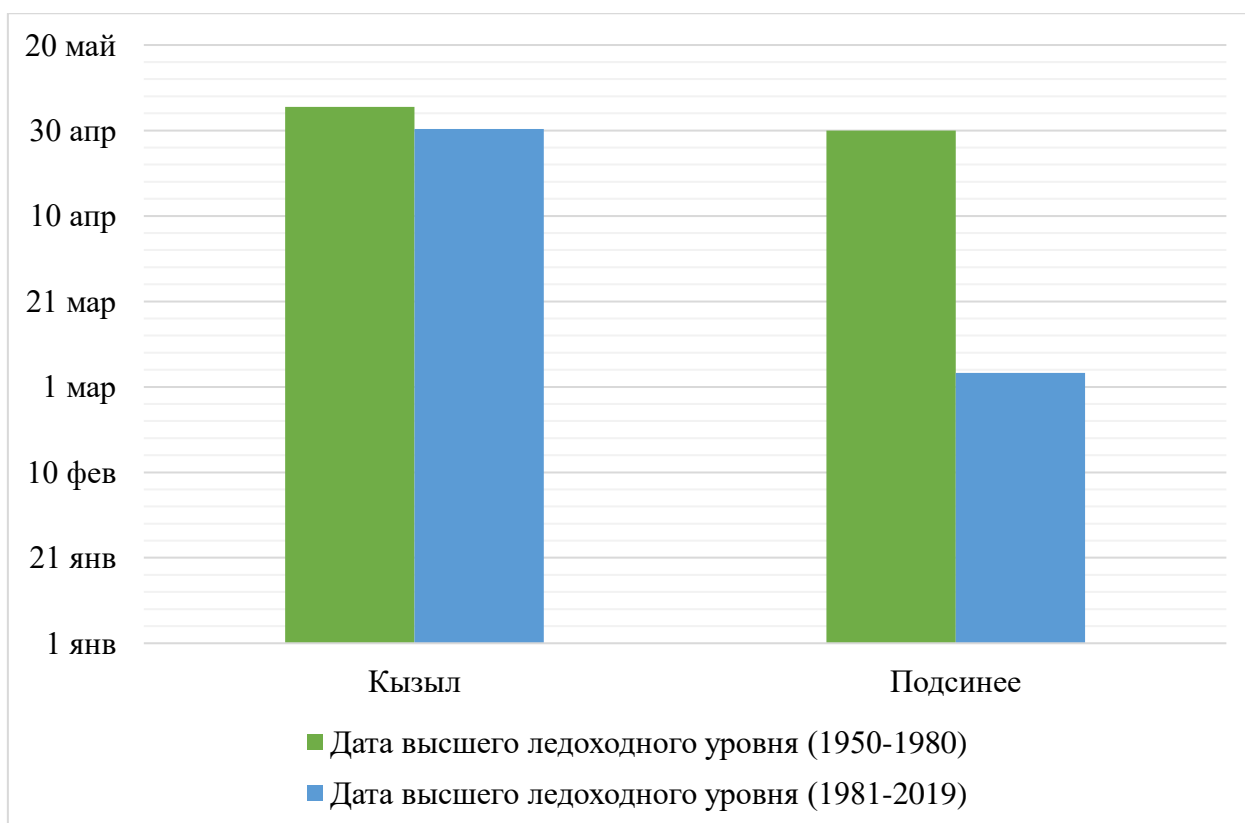


Рисунок 3.13. Дата высшего ледоходного уровня воды в верхнем течении Енисея (1950-2019)

В г. Кызыл в период с 1950 по 1980 гг. дата высшего ледоходного уровня в среднем приходилась на 5 мая, в период с 1981 по 2019 гг. дата высшего ледоходного уровня сместилась на 5 дней раньше – в среднем 30 апреля.

В с. Подсинее в период с 1950 по 1980 гг. дата высшего ледоходного уровня в среднем приходилась на 29 апреля, в период с 1981 по 2019 гг. дата высшего ледоходного уровня сместилась на 1,5 месяца раньше – в среднем 4 марта.

На рисунке 3.14 представлена гистограмма распределения дат высшего ледоходного уровня в русле среднего течения Енисея.

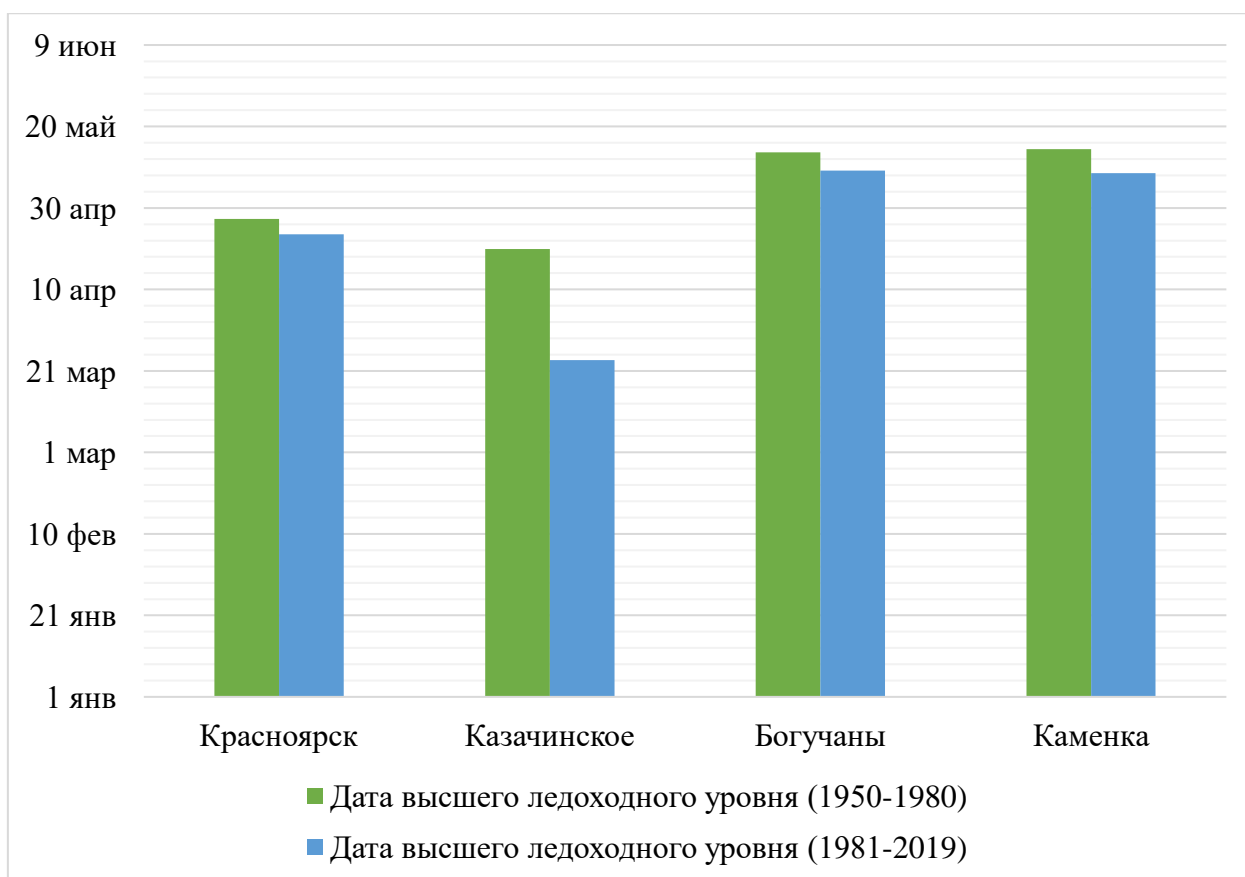


Рисунок 3.14. Дата высшего ледоходного уровня воды в среднем течении Енисея (1950-2019)

В г. Красноярск в период с 1950 по 1980 гг. дата высшего ледоходного уровня в среднем приходилась на 27 апреля, в период с 1981 по 2019 гг. дата высшего ледоходного уровня сместилась 4 дня раньше – в среднем 23 апреля.

В с. Казачинское в период с 1950 по 1980 гг. дата высшего ледоходного уровня в среднем приходилась на 19 апреля, в период с 1981 по 2019 гг. дата высшего ледоходного уровня сместилась на 27 дней раньше – в среднем 23 марта.

В с. Богучаны в период с 1950 по 1980 гг. дата высшего ледоходного уровня в среднем приходилась на 13 мая, в период с 1981 по 2019 гг. дата высшего ледоходного уровня сместилась на 6 дней раньше – в среднем 7 мая.

В д. Каменка в период с 1950 по 1980 гг. дата высшего ледоходного уровня в среднем приходилась на 14 мая, в период с 1981 по 2019 гг. дата высшего ледоходного уровня сместилась на 6 дней раньше – в среднем 8 мая.

На рисунке 3.15 представлена гистограмма распределения дат высшего ледоходного уровня в русле нижнего течения Енисея.

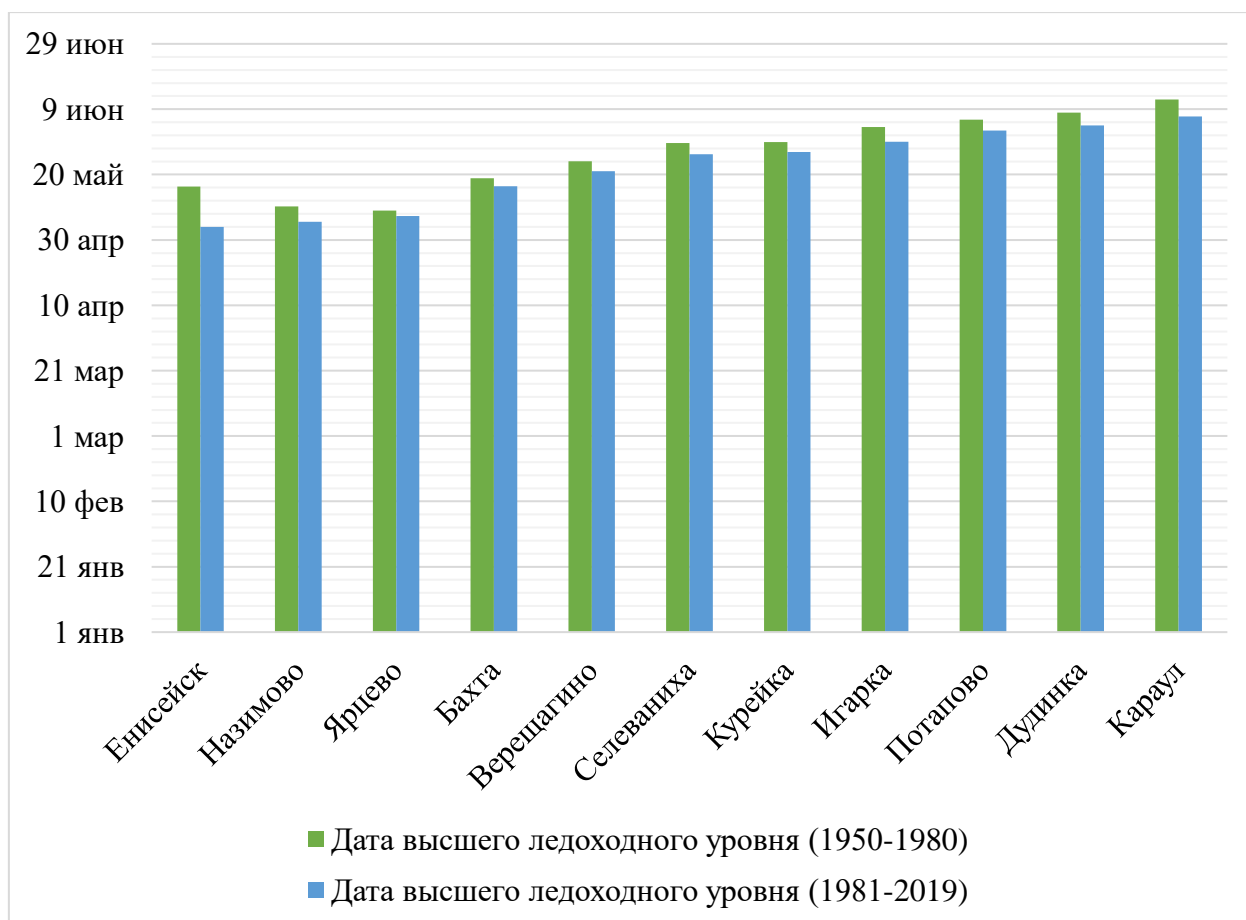


Рисунок 3.15. Дата высшего ледоходного уровня воды в нижнем течении Енисея (1950-2019)

В г. Енисейск в период с 1950 по 1980 гг. дата высшего ледоходного уровня ледостава в среднем приходилась на 16 мая, в период с 1981 по 2019 гг. дата высшего ледоходного уровня сместилась на 13 дней раньше – в среднем 3 мая.

В д. Назимово в период с 1950 по 1980 гг. дата высшего ледоходного уровня в среднем приходилась на 10 мая, в период с 1981 по 2019 гг. дата высшего ледоходного уровня сместилась на 5 дней раньше – в среднем 5 мая.

В с. Ярцево в период с 1950 по 1980 гг. дата высшего ледоходного уровня в среднем приходилась на 9 мая, в период с 1981 по 2019 гг. дата высшего ледоходного уровня сместилась на 2 дня раньше – в среднем 7 мая.

В п. Бахта в период с 1950 по 1980 гг. дата высшего ледоходного уровня в среднем приходилась на 18 мая, в период с 1981 по 2019 гг. дата высшего ледоходного уровня сместилась на 2 дня раньше – в среднем 16 мая.

В с. Верещагино в период с 1950 по 1980 гг. дата высшего ледоходного уровня в среднем приходилась на 24 мая, в период с 1981 по 2019 гг. дата высшего ледоходного уровня сместилась на 3 дня раньше – в среднем 21 мая.

В д. Селиваниха в период с 1950 по 1980 гг. дата высшего ледоходного уровня в среднем приходилась на 29 мая, в период с 1981 по 2019 гг. дата высшего ледоходного уровня сместилась на 3 дня раньше – в среднем 26 мая.

В п. Курейка в период с 1950 по 1980 гг. дата высшего ледоходного уровня в среднем приходилась на 29 мая, в период с 1981 по 2019 гг. дата высшего ледоходного уровня сместилась на 3 дня раньше – в среднем 26 мая.

В г. Игарка в период с 1950 по 1980 гг. дата высшего ледоходного уровня в среднем приходилась на 3 июня, в период с 1981 по 2019 гг. дата высшего ледоходного уровня сместилась на 4 дня раньше – в среднем на 30 мая.

В д. Потапово в период с 1950 по 1980 гг. дата высшего ледоходного уровня в среднем приходилась на 5 июня, в период с 1981 по 2019 гг. дата высшего ледоходного уровня сместилась на 3 дня раньше – в среднем 2 июня.

В г. Дудинка в период с 1950 по 1980 гг. дата высшего ледоходного уровня в среднем приходилась на 7 июня, в период с 1981 по 2019 гг. дата высшего ледоходного уровня сместилась на 3 дня раньше – в среднем 4 июня.

В с. Караул в период с 1950 по 1980 гг. дата высшего ледоходного уровня в среднем приходилась на 11 июня, в период с 1981 по 2019 гг. дата высшего ледоходного уровня сместилась на 5 дней раньше – в среднем 6 июня.

В приложении 1 приведена таблица статистических характеристик основных элементов ледового режима по опорным гидрологическим постам на реках Енисей и Ангара, обобщающая информацию описанную в главах 3.2-3.4.

3.5. Условия формирования высших уровней воды за год

Уровни воды на реках формируются под влиянием многих постоянно и перемененно действующих факторов, связь между которыми выявить довольно сложно, в некоторых случаях даже невозможно, отсюда следует, что формирование уровней воды имеет стохастический характер (Евстигнеев, Магрицкий, 2016). В приведенной работе также говорится о влиянии динамических факторов формирования стока, к которым авторы относят сезонные и циклические колебания, при этом отмечается, что динамические факторы тем более значимы, чем более зарегулирован речной сток. Особенности формирования и методы прогнозирования уровня режима определяются преобладанием тех или иных факторов.

По причине того, что условия и факторы формирования высших уровней воды за период весеннего ледохода (Сумачев, 2022) и за год зачастую имеют стохастическую природу, в настоящее время принято разрабатывать локальные методики прогнозирования высшего уровня воды за эти периоды в зависимости от наиболее информативных предикторов, при этом не учитываются постоянно действующие факторы, так как они не вносят вклад в вариацию высших уровней. При этом разделение участков рек Енисея и Ангары на несколько групп по условиям формирования высших уровней воды за год может облегчить определение наиболее информативных предикторов и позволить разработать единые методики прогнозирования для тех участков, условия формирования уровней воды которых схожи.

Высшие уровни воды за год могут формироваться при различных периодах ледового режима на реках. На реках Енисей и Ангара были выделены пять условий формирования высших уровней воды за год:

- 1) при свободном русле;
- 2) при заторах;
- 3) при весеннем ледоходе;
- 4) во время подготовительного периода.

В случае первого условия – при свободном русле – формирование высших уровней воды за год представляет собой период, когда русло реки полностью очищается ото льда.

Для второго условия – при заторах – формирование высших уровней воды за год происходит во время заторных явлений и соответственно высших заторных уровней.

Третье условие – при весеннем ледоходе – представляет собой период до очищения русла реки ото льда, после окончания ледостава, когда лёд на реке начинает своё движение по руслу, вниз по течению – период ледоходных явлений. В этом случае формирование высших уровней воды за год приходится на высшие ледоходные уровни воды.

Четвертое условие – во время подготовительного периода – представляет собой период, включающий в себя период высших уровней воды, которые были зафиксированы до начала ледохода.

В таблице 3.16 представлены значения доли различных условий в формировании высших уровней воды за год, а также средний уровень воды для количества случаев фиксации высшего уровня воды за год в один из периодов ледового режима.

Таблица 3.16. Условия формирования высших уровней воды за год на реках Енисей и Ангара

Г/п	Подготовительный период (%/см)	Ледоход (%/см)	Затор (%/см)	Свободное русло (%/см)
г. Кызыл	0/0	3%/569	0/0	97%/539
с. Подсинее	17%/378	3%/330	0/0	80%/335
г. Красноярск	7,4%/278	2,9%/270	1,5%/631	88,2%/402
с. Казачинское	46,4 %/634	1,5%/697	2,9%/862	49%/676
г. Енисейск	31,9%/892	37,7%/993	1,5%/857	28,9%/903
с. Назимово	16%/699	38%/739	7%/1028	39%/699
с. Ярцево	13%/904	46%/1100	19%/1211	22%/1015
д. Бахта	2%/1303	47%/1456	5%/1570	46%/1514
с. Верещагино	0/0	58%/1880	7,2%/1985	34,8%/1760
с. Селиваниха	1,5%/1746	27,5%/1866	3%/2032	68%/1906
с. Курейка	1,4%/1980	34,8%/1895	0/0	63,8%/1957
г. Игарка	0/0	73,9%/1637	4,4%/1617	21,7%/1582
с. Потапово	1,6%/1069	90%/1471	5%/1385	3,4%/1307

г. Дудинка	8,7%/1121	81,2%/1333	7,3%/1580	2,8%/1305
с. Караул	6,8%/699	83%/757	1,7%/1150	8,5%/770
с. Богучаны	11,9%/342	53,7%/486	16,4%/567	18%/326
д. Каменка	20,9%/658	50,8%/697	8,9%/962	19,4%/537

В верхнем течении реки Енисей для двух опорных гидрологических постов формирование высших уровней воды за год в основном происходит при свободном русле. Так, для г/п г. Кызыл доля образования высших уровней воды за год при свободном русле составляет 97%, 3% приходится на период ледохода. Для г/п с. Подсинее 80% высших уровней воды за год формируется при свободном русле, 17% – в подготовительный период и 3% – в период ледохода.

Для среднего течения реки Енисей для двух, расположенных в этом районе гидрологических постов, формирование высших уровней воды за год так же, как и для гидрологических постов верхнего течения, приходится на период полного очищения русла реки в этом районе – когда русло реки полностью свободно ото льда. Стоит отметить, что в г/п г. Красноярск было построено Красноярское водохранилище, которое значительно повлияло на формирование ледового покрова в районе этого гидрологического поста. По этой же причине устойчивый ледовый покров не формировался здесь с 1968 года, поэтому при проведении расчётов было выявлено, что большинство высших уровней воды за год формируется при свободном русле. Затонные явления происходили до постройки водохранилища – в период с 1950 по 1968 года – на данное условие приходится 1,5% формирования высших уровней воды за год. Также при ледоходе доля образования высших уровней воды за год составляет 2,9%, при подготовительном периоде – 7,4%. Для г/п с. Казачинское большая часть – 49 % – высших уровней воды приходится на период свободного русла, 46% высших уровней воды приходится на подготовительный период, 1,5% – при ледоходе, 2,9% – при заторах.

Для среднего течения реки Ангара, входящего в район среднего течения реки Енисей, формирование высших уровней воды за год в основном происходит при ледоходе: 53,7% для г/п с. Богучаны, 50,8% для г/п д. Каменка. Стоит

отметить, что в обоих гидрологических постах высшие уровни воды за год могут формироваться во все представленные выше условия. Так, в г/п с. Богучаны высшие уровни воды за год фиксировались в 11,9% случаев при подготовительном периоде, при заторах – 16,4%, при свободном русле – 18%. В г/п д. Каменка на подготовительный период приходилось 20,9% формирования высших уровней воды за год, на период заторных явлений – 8,9%, на период свободного русла – 19,4%.

Район нижнего течения реки Енисей включает в себя 11 опорных гидрологических постов. Формирование высших уровней воды за год здесь происходит практически при всех условиях. В г/п г. Енисейск, с. Ярцево, д. Бахта и с. Селиваниха высшие уровни воды за год формируются в основном при ледоходе: 37,7%, 46%, 47% и 58% соответственно. В г/п г. Енисейск высшие уровни воды за год формируются при подготовительном периоде в 31,9% случаев, при заторах – 1,5% и при свободном русле 28,9%. Стоит отметить, что для данного поста формирование высших уровней воды за год практически в равном соотношении фиксируется при трёх условиях – при ледоходе, при свободном русле и в подготовительный период. Для г/п с. Назимово доля появления высших уровней воды за год во время ледохода составляет 38%, практически, как и при свободном русле – 39%. Следует отметить, что высшие уровни воды за год также формируются в подготовительный период и при заторах – 16% и 7% соответственно. Примечательно, что в г/п д. Бахта формирование высших уровней воды за год приходится в основном на ледоходный период и период свободного русла – 47% и 46% соответственно; на подготовительный период приходится 2%, при заторах – 5%. Для гидрологических постов с. Селиваниха и с. Курейка доля образования высших уровней воды за год при свободном русле доминирует и соответственно составляет 68% и 63,8%.

Ниже по течению реки Енисей доля формирования высших уровней воды за год во время ледоходного периода увеличивается. Так, уже в г/п г. Игарка она

составляет 73,9%, в г/п с. Потапово – 90%, в г/п г. Дудинка – 81,2%, в г/п с. Караул – 83%.

Как было замечено выше, формирование высших уровней воды за год приходится на различные условия ледового режима рек Енисей и Ангара. На районы верхнего течения и среднего течения реки Енисей наибольшее влияние оказывает период полного очищения русла реки ото льда – в это время присутствует большая вероятность того, что будут зафиксированы высшие уровни воды за год. Для среднего течения реки Ангара и большинства гидрологических постов нижнего течения реки Енисей ледоходный период играет наиболее значительную роль в формировании высших уровней воды за год.

Классификация участков рек по степени стохастичности формирования высших уровней воды (Сумачев, 2022) основана на выполнении условий множества факторов: относительных величин высшего уровня воды, степени вариации высших уровней, асимметрии высших уровней воды и их связи с высшими предледоходными уровнями воды, а также географического положения. В работе (Сумачев, 2022) представлено разделение на две основные группы и одну промежуточную: реки с преимущественно стохастическим механизмом формирования высшего уровня за период ледохода, участки рек с преимущественно динамическим механизмом формирования высшего уровня ледохода. К промежуточной группе автор относит участки рек, для которых несмотря на стохастическую природу формирования высшего уровня ледохода значительное влияние имеют динамические факторы и наоборот.

На основе приведенной в упомянутой выше работе классификации было разработано подобное ей разделение рек Енисей и Ангара и их участков на определенное количество групп.

Классификация участков рек по условиям формирования высших уровней воды за год на реках Енисей и Ангара. Первый тип включает в себя опорные гидрологические посты, которые расположены до Красноярской ГЭС: г. Кызыл, с. Подсинее и г. Красноярск соответственно, представленные г/п относятся к

верхнему и среднему течению Ангаро-Енисейского бассейна. Для данного типа характерно формирование высших уровней воды за год после окончания весеннего ледохода и полного очищения русла реки ото льда, то есть в период свободного ото льда русла река. Повторяемость заторов на этих участках невелика и варьируется от 0 до 2%. Как отмечалось ранее, в г/п г. Красноярск формирование ледового покрова не происходило с 1968 года после заполнения водохранилища, расположенного в этом пункте, поэтому полученные результаты приурочены на период до характерного повышения температуры воздуха и соответственного влияния изменений климата на ледовый режим рек. В главе 3 объяснено влияние Красноярской ГЭС на характер ледового режима на участках рек, расположенный ниже по течению.

Для второго типа рек характерны высокие коэффициенты корреляции высших уровней воды за год и высших ледоходных уровней воды (приложение 2, таблица 6). Формирование высших уровней воды за год происходит в период весеннего ледохода. Данный тип включает в себя гидрологические посты, расположенные в нижнем течении реки Енисей после впадения в неё Ангары, а также два пункта на самой Ангаре. Повторяемость заторов на этих участках варьируется от 0 до 19%.

Третий тип выделяется как промежуточный, и к нему относится только один гидрологический пост, который располагается в 50 км до впадения Ангары в Енисей и относится к среднему течению Енисея. Коэффициенты корреляции между высшими уровнями воды за год и высшими ледоходными уровнями невысоки. Формирование высших уровней воды за год происходит до появления весеннего ледохода и при свободного русла реки в равной степени.

3.6. Влияние изменений климата на ледовый режим Ангаро-Енисейского бассейна

Для Енисея развитие весенних процессов в основном зависит от климатических условий. Климатические условия оказывают определяющее влияние на сроки вскрытия рек и начала ледохода, на его характер и

продолжительность, а также на скорость, с какой происходит передвижение по реке волны вскрытия. В затяжные весны взламывание и разрушение ледяного покрова на участках верхнего течения происходит медленно. В это же время в нижнем течении лёд значительной степени разрушается под влиянием теплового фактора и к моменту прихода из верхней части бассейна волны половодья сравнительно легко подвергается механическому взлому, что ускоряет процесс вскрытия. В таких случаях ледоход проходит спокойно и весной не образуются мощные заторы льда.

Во время скоротечной весны мощная волна половодья, возникшая в короткий срок, быстро перемещается вниз по реке, встречая прочный ледяной покров, слабо подготовленный для вскрытия. Для того, чтобы преодолеть его сопротивление необходимо применить большую механическую энергию за счёт накопления воды перед заторными участками. В подобных случаях ледоход носит бурный, прерывистой характер и проходит при заторах льда и высоких горизонтах воды. Процесс взламывания в нижнем течении осложняется также значительно большей толщиной льда, чем в верхнем течении.

В таблицах 2.2-2.4 приведена осредненная оценка статистической значимости линейных трендов среднемесячной температуры воздуха для трёх районов Ангаро-Енисейского бассейна. В главах 3.2-3.4 приведены диаграммы изменения дат формирования ледового покрова, вскрытия рек ото льда, продолжительности ледостава и формирования высшего ледоходного уровня воды для трёх районов Ангаро-Енисейского бассейна.

Полученные значения температуры воздуха и смещения сроков характеристик ледового режима рек показали, что с изменением среднемноголетней температуры воздуха происходит смещение сроков образования ледового покрова и вскрытия рассматриваемых рек на всех гидрологических постах. При увеличении температуры воздуха сроки образования ледостава смещаются на более поздние сроки, в то время как очищение реки ото льда происходит в более ранние. В среднем для гидрологических постов верхнего течения Енисея дата образования ледостава

сместилась на 36 дней позднее, среднего течения – на 12 дней позднее, нижнего течения – на 7 дней позднее. Смещение сроков очищения рек ото льда имеет аналогичную связь с изменением температуры воздуха: в верхнем течении последний день ледостава в среднем приходится на 33 дня раньше, в среднем течении – на 13 дней раньше, в нижнем течении – на 13 дней раньше.

Глава 4. Гидрологическое прогнозирование

4.1 Общие положения о гидрологическом прогнозировании

Гидрологический прогноз представляет собой заблаговременный расчёт интересующего элемента (явления) гидрологического режима в конкретных физико-географических условиях, основанный на знании закономерностей природных процессов, определяющих это явление. Каждый гидрологический прогноз должен иметь ту или иную заблаговременность, под которой понимается промежуток времени от момента составления прогноза до даты наступления или окончания предсказываемого явления.

Гидрологические прогнозы разделяются на различные виды в зависимости от характера режима рек и озёр и интересов народно-хозяйственных организаций.

В основе классификации гидрологических прогнозов лежат три основных признака: заблаговременность прогнозов; предсказываемые явления и элементы режима; целевое назначение прогнозов.

По заблаговременности гидрологические прогнозы делятся на долгосрочные и краткосрочные.

К краткосрочным прогнозам относятся прогнозы с заблаговременностью, не превышающей 10-15 суток. Заблаговременность долгосрочных гидрологических прогнозов составляет обычно от 1-2 до 6-8 месяцев.

По зависимости о предсказываемых явлениях гидрологические прогнозы делятся на прогнозы элементов водного режима (водные прогнозы) и элементов ледового режима (ледовые прогнозы). Каждый из этих прогнозов по заблаговременности делится на долгосрочные и краткосрочные.

По целевому назначению гидрологические прогнозы разделяются на прогнозы общего пользования и специализированные прогнозы для различных отраслей народного хозяйства.

К прогнозам общего пользования относятся прогнозы, представляющие общий интерес (прогнозы максимального уровня половодья и паводков и предупреждения о наводнениях). Специализированные прогнозы учитывают

специфику требований отраслей народного хозяйства, как гидроэнергетика, водный транспорт и орошаемое земледелие.

Существующие методы гидрологических прогнозов можно разделить на основные группы:

- 1) методы, вытекающие из закономерностей движения воды в руслах (гидродинамические методы и приближенные способы расчёта перемещения и трансформации паводков на участке реки, являющиеся основой краткосрочных прогнозов уровней и расходов)
- 2) методы, вытекающие из закономерностей процессов формирования стока в речном бассейне (воднобалансовые методы прогноза стока половодья и паводков и методы расчёта их гидрографов)
- 3) методы, вытекающие из закономерностей теплообмена в реках, озерах и водохранилищах, происходящих под влияние гидрометеорологических факторов (методы приближенного расчёта охлаждения вод, нарастания и таяния льда, являющиеся основой краткосрочных прогнозов сроков замерзания и вскрытия рек и других водных объектов)
- 4) методы, в основе которых лежат корреляционные связи интересующей нас переменной с одним или несколькими причинными факторами; подобные связи используются для прогнозов недостаточно изученных явлений или при недостатке данных, необходимых для более глубокого физического анализа (корреляционные связи сроков наступления различных ледовых явлений с характеристиками атмосферной циркуляции, используемые в долгосрочных ледовых прогнозах, и долгосрочные прогнозы стока горных рек, которые основываются на корреляционных связях этого стока с показателями накопления снега в горах).

Эмпирические зависимости представляют собой зависимости, которые устанавливаются на основании материалов наблюдений за прошлое время. Эмпирические зависимости могут выражать непосредственно связь

интересующей переменной величины с обуславливающими её причинными факторами и закономерности её изменения в зависимости от постоянно действующих факторов.

Для первого вида зависимостей используются графические построения и методы корреляционного анализа. Второй тип зависимостей устанавливается с помощью усреднения и исключения влияния переменных факторов (среднее определение стока горной реки за весенне-летний период в зависимости от распределения площади водосбора по высоте над уровнем моря).

Большую роль в установлении эмпирических зависимостей играет точность исходных данных. По этой причине обработка материалов наблюдений и вычисление по ним различных характеристик в гидрологических исследованиях имеет важное значение.

Эмпирические зависимости находят двумя путями: либо путем построения графиков, либо аналитически, пользуясь методами корреляционного анализа. Корреляционный анализ позволяет решать задачу для большого числа переменных; они более просты для линейных зависимостей и более сложны для нелинейных.

Принципы оценки методов и оправдываемости гидрологических прогнозов. Оценка прогнозов имеет две цели:

- 1) установление степени точности и эффективности методики прогнозирования;
- 2) определение степени удачности прогноза или их совокупности после осуществления предсказанного явления.

Первая оценка необходима для решения вопроса о практической применимости той или иной методики прогноза, вторая – для сравнительной оценки успешности работы службы органов гидрологических прогнозов.

Основные требования для удовлетворения оценки методики и оправдываемости прогнозов – это объективность определения критериев оценки и их сравнимость для различных водных объектов.

Стохастический характер многих элементов гидрологического режима позволяет статистически оценить возможные их значения в будущем.

Одно из главных требований к прогностическим моделям, предназначенных для внедрения на сети Росгидромета, является простота в практическом применении – все предикторы должны определяться непосредственно наблюдателями в штатном режиме. С учётом высокой рабочей нагрузки наблюдателей сети использование каких-либо неоднозначных предикторов, определение которых может занять не один день, невозможно, так как в итоге это приведёт к невозможности прогнозирования гидрологического события в оперативном режиме. Мировой опыт (Руководство..., 2012) практического прогнозирования указывает на необходимость использования наиболее простых, но в то же время эффективных моделей, реализуемых в виде регрессионных уравнений.

Любая методика прогноза может считаться эффективной и применение её оправданным только, когда ошибки прогнозов будут существенно меньше равновероятных отклонений предсказываемой переменной от среднего или другого значения, вероятность которого устанавливается статистически. Иначе прогнозы не имеют практического применения, потому что тот же результат в отношении распределения ошибок можно получить, ориентируясь на среднее или другое статистически обоснованное значение предсказываемой переменной.

Основной принцип оценки эффективности методов прогнозирования состоит в сравнении ошибок прогнозов по методу отклонения от среднего или другого значения предсказываемой переменной, на которое статистически выгоднее ориентироваться при отсутствии метода прогноза.

Критерии оценки качества прогнозов представлены в работе (Попов Е. Г., 1979). Ошибка прогноза вычисляется как разность между фактическим и вычисленным y' значениями

$$\delta = y - y'$$

Мерой вариации ошибок прогнозов является средняя квадратическая ошибка

$$s = \sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{n}}$$

n – число проверочных прогнозов.

В качестве числовой оценки эффективности методов прогнозирования используются отношения

$$\frac{s}{\sigma} \text{ или } \frac{s}{\sigma_{\Delta}}$$

S – среднеквадратическая ошибка проверочных прогнозов; σ – среднее квадратическое отклонения предсказываемой переменной от нормы; σ_{Δ} – среднее квадратическое отклонение изменений этой переменной от среднего её изменения за период заблаговременности прогноза.

Среднее квадратическое отклонение изменений переменной за период заблаговременности прогноза вычисляется по формуле

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{n}}$$

Δ_i – изменение предсказываемой переменной за период заблаговременности прогноза; $\bar{\Delta}$ – среднее изменение (норма); n – число случаев.

Отношения, приведенные выше, характеризуют точность методики прогнозов. Чем они меньше, тем точнее методика. Отношение $\frac{s}{\sigma}$ используется для оценки методики долгосрочных прогнозов, отношение $\frac{s}{\sigma_{\Delta}}$ для оценки методики краткосрочных прогнозов.

Приемлемыми для выпуска прогнозов принято считать такие методы, для которых отношения $\frac{s}{\sigma}$ или $\frac{s}{\sigma_{\Delta}}$ не превышают 0,8 при числе проверочных прогнозов не менее 25.

К категории хороших методик прогнозов относятся такие, для которых $\frac{s}{\sigma} < 0,5$; к категории удовлетворительных, когда $\frac{s}{\sigma}$ колеблется от 0,5 до 0,8.

Критерием оправдываемости каждого отдельного прогноза или их совокупности служит допустимая ошибка. Оправдавшимися считаются

прогнозы, ошибки которых меньше или равны допустимой. Такая оценка является условной и не отвечает вероятностному характеру прогнозов.

За допустимую ошибку принимается вероятное изменение предсказываемой переменной за период заблаговременности прогноза

$$\Delta_{\text{доп}}=0,674\sigma_{\Delta},$$

для долгосрочных прогнозов – вероятное её отклонение от нормы

$$\Delta_{\text{доп}}=0,674\sigma.$$

Оправдываемость совокупности прогнозов вычисляется как отношение числа прогнозов с ошибками, не превышающими допустимую, к общему числу прогнозов и выражается в процентах.

4.2 Современное представление о методах прогнозирования экстремальных характеристик гидрологического режима

Метод соответственных уровней. Данный метод является одним из простейших и старейших приемов краткосрочных прогнозов. Суть метода заключается в установлении связи между значениями уровня воды на верхнем посту слабоприточного участка и соответствующими значениями уровня на нижнем посту. Разница во времени наступления соответственных уровней на верхнем и нижнем постах определяет возможную заблаговременность прогноза. Наилучшие результаты метод соответственных уровней даёт применительно к прогнозам расходов и уровней.

Связи соответственных уровней устанавливаются с помощью корреляции или графически. Для каждого метода необходимо определять время пробега гребня волны паводка между постами в зависимости от самой волны.

Теснота и вид связи соответственных уровней определяется несколькими факторами. Главные из них – это относительная величина и изменчивость бокового притока на участке реки, устойчивость русла и его морфометрические особенности, определяющие вид кривых расходов и степень трансформации волны паводка. Чем больше относительная величина бокового притока и его изменчивость, тем менее тесной оказывается связь соответственных уровней.

Неустойчивость русла в створах постов влечет за собой снижение тесноты связи, следовательно, снижение точности прогнозов.

Практическое определение соответственных уровней. Самым простым способом определения соответственных уровней является сопоставление графиков колебания уровня воды на двух постах и нахождения на них характерных точек. К таким характерным точкам относятся максимумы и минимумы уровня. Выделение на графиках колебания уровней характерных переломных точек позволяет одновременно находить время пробега воды между постами и значения самих соответственных уровней. Время добегания определяется как разность между сроками наступления характерных уровней на нижнем и верхнем водомерных постах. Наиболее показательны это иллюстрируют пики отдельных паводков.

Порядок определения соответственных уровней начинается с выбора соответствующих значений уровня воды и даты их наступления на верхнем и нижнем постах, это выполняется для каждой пары намеченных на совмещенных графиках характерных точек, полученные таким образом значения записываются в таблицу. По данным таблицы устанавливают, насколько сильно меняется время добегания при различных уровнях и насколько закономерны его изменения.

При сравнительно малом изменении времени добегания и невозможности заметить закономерные его изменения в связи с изменениями уровня воды по данным таблицы вычисляется среднее значение времени добегания. Если время добегания значительно меняется и изменения связаны с уровнем, то по данным таблицы считаются средние значения времени добегания для различных уровней – низких, средних и высоких. Для облегчения задачи выявления зависимости времени добегания от уровня последние следует располагать в убывающем порядке.

Глава 5. Прогнозирование элементов ледового режима рек, разработка и верификация модели прогнозирования

В главе 4 рассматривается гидрологическое прогнозирование в теоретической форме, описываются виды прогнозов и методы прогнозирования в общем виде. В главе 5 приводятся практические способы прогнозирования тех или иных элементов ледового режима рек, а именно Ангаро-Енисейского бассейна (Енисей и Ангара).

Полученная в главе 3.5 классификация участков рек по условиям формирования высших уровней воды за год предполагает возможность использования универсальной прогностической формулы для участков рек второго типа. Подобная формула требует приведения данных высших уровней воды за год к стандартному виду, это выполняется путем деления разности между каждым значением уровня воды за год и нормой (средним значением) на стандартное отклонение. Полученный стандартизованный ряд значений имеет среднее, которое равно 0 и стандартное отклонение, равное 1.

Между полученными стандартизованными значениями высших уровней воды за год на гидрологическом посту д. Бахта и на гидрологических постах, расположенных ниже по течению, была получена корреляционная зависимость, которая показала тесную связь между этими значениями (рисунок 5.1). Коэффициент детерминации равен 0,5.

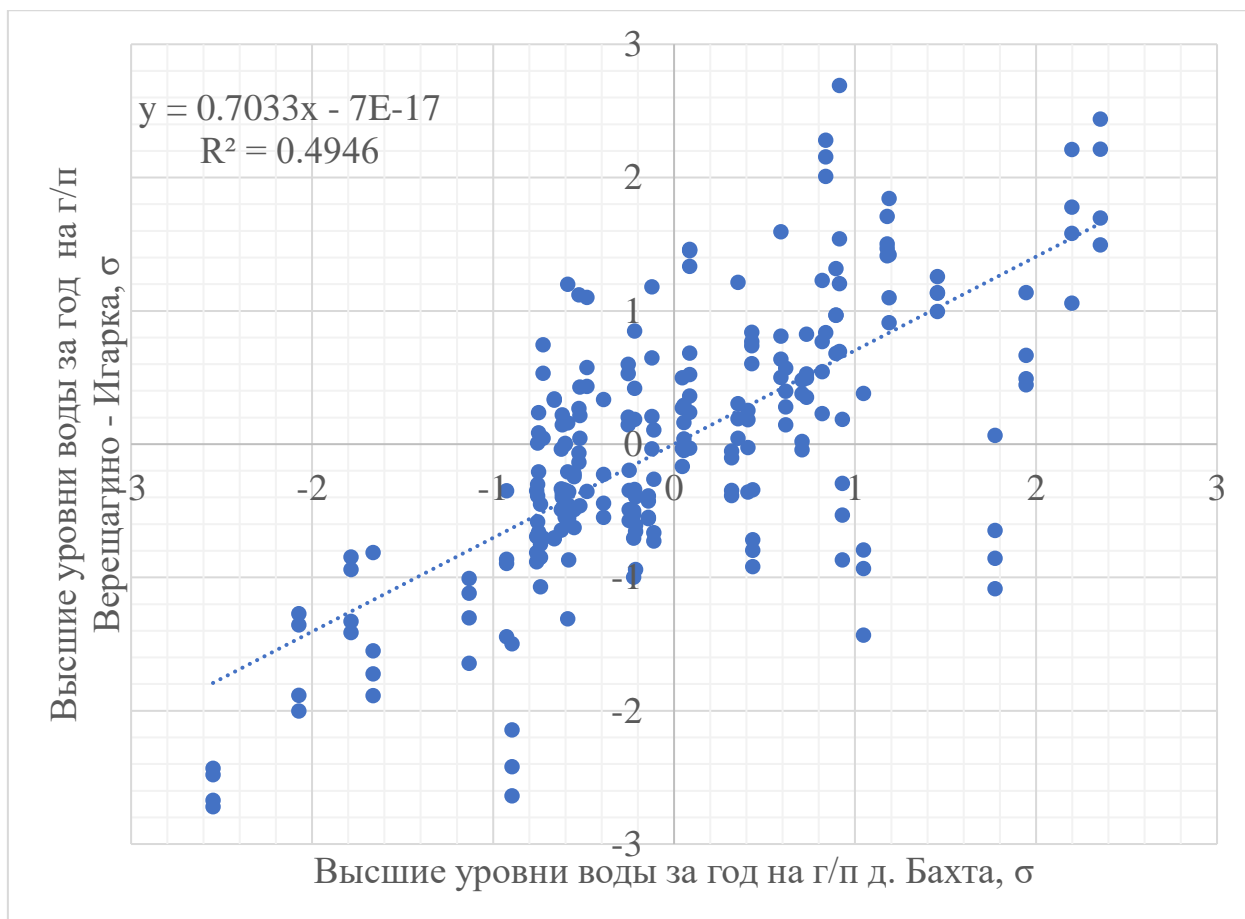


Рисунок 5.1. Корреляционная зависимость между стандартизованными значениями высших уровней воды за год на г/п д. Бахта и на г/п с. Верещагино – г. Игарка

На основе стандартизованных данных для нижнего течения реки Енисей была разработана единая стандартизованная формула (5.1) для прогнозирования высшего уровня воды за год. Заблаговременность прогноза различается в зависимости от расположения ниже по течению гидрологических постов, однако в среднем равна 10 дней.

$$N_{\text{прогн.высш}(x)} = 0,70 * N_{\text{высш.Бахта}} * \sigma_x + \bar{N}_{\text{высш}(x)}, \quad (5.1)$$

где $N_{\text{прогн.высш}(x)}$ – прогнозируемый высший уровень воды за год в пункте x ; $N_{\text{высш. Бахта}}$ – стандартизованный высший уровень воды за год в г/п д. Бахта; σ_x – стандартное отклонение высшего уровня воды за год в пункте x ; $\bar{N}_{\text{высш}(x)}$ – среднее значение высшего уровня воды за год в пункте x .

По полученной стандартизованной формуле были рассчитаны прогнозные значения высших уровней воды за год для каждого года рассматриваемого периода. При помощи подсчитанной заблаговременности между контрольными постами и предиктором были получены даты выпуска прогноза рассчитанных по формуле (5.1) значений высших уровней воды за год. После этого высшие уровни воды за год были выписаны из (Гидрологические ежегодники..., 1950-2019) на дату выпуска прогноза. На рисунках представлены прогнозные и наблюдаемые значения высшего уровня воды за год (рис. 5.2-5.6) на контрольных постах и на гидрологическом посту, значения высшего уровня воды на котором использовались в качестве независимого материала, а также прогнозные и значения на дату выпуска прогноза (рис. 5.7-5.10).

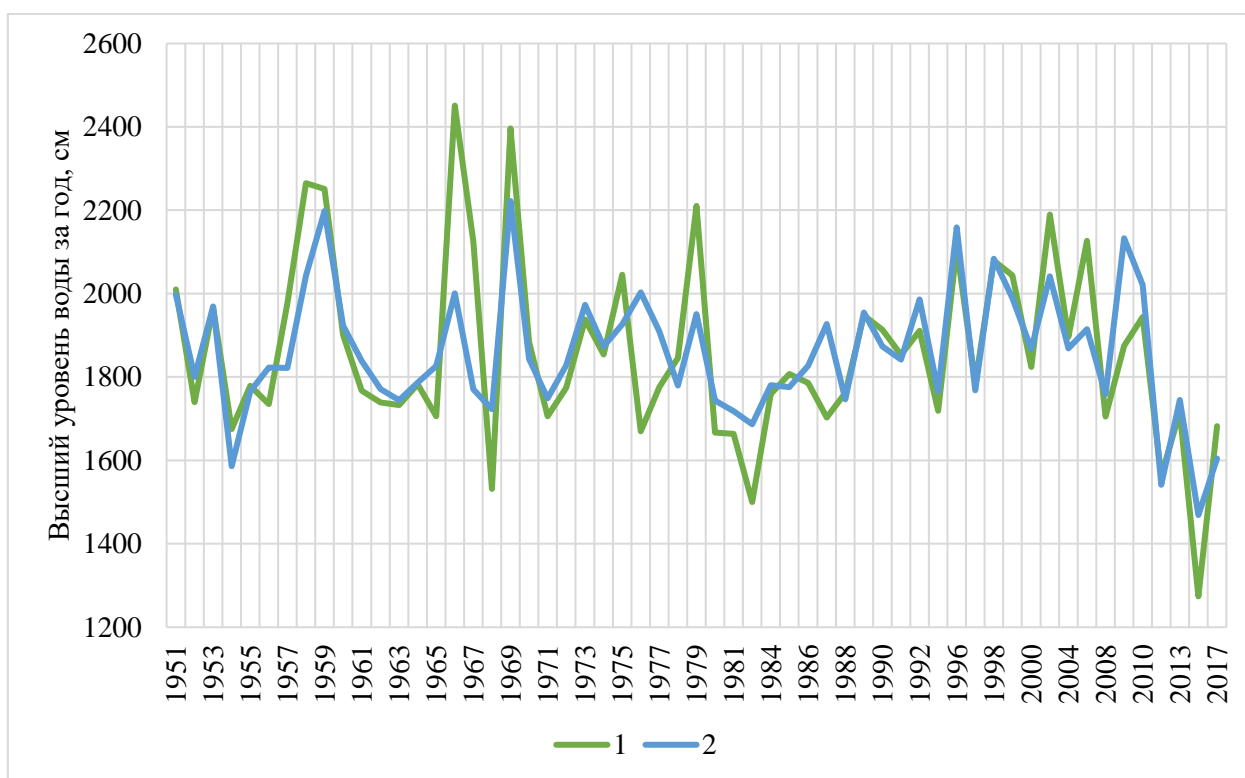


Рисунок 5.2. Результаты прогнозирования высшего уровня воды за год в г/п с. Верещагино (1 – наблюдаемые значения, 2 – прогнозные значения)

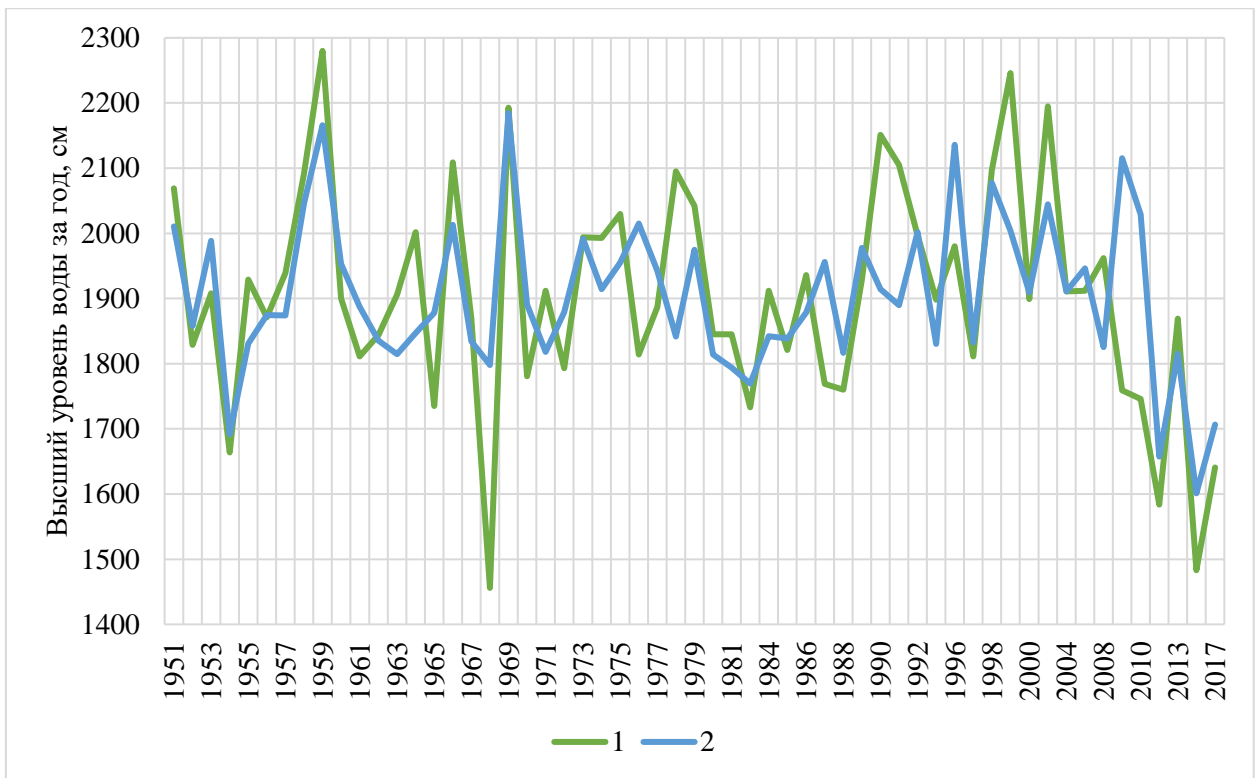


Рисунок 5.3. Результаты прогнозирования высшего уровня воды за год в с. Селиваниха (1 – наблюдаемые значения, 2 – прогнозные значения)

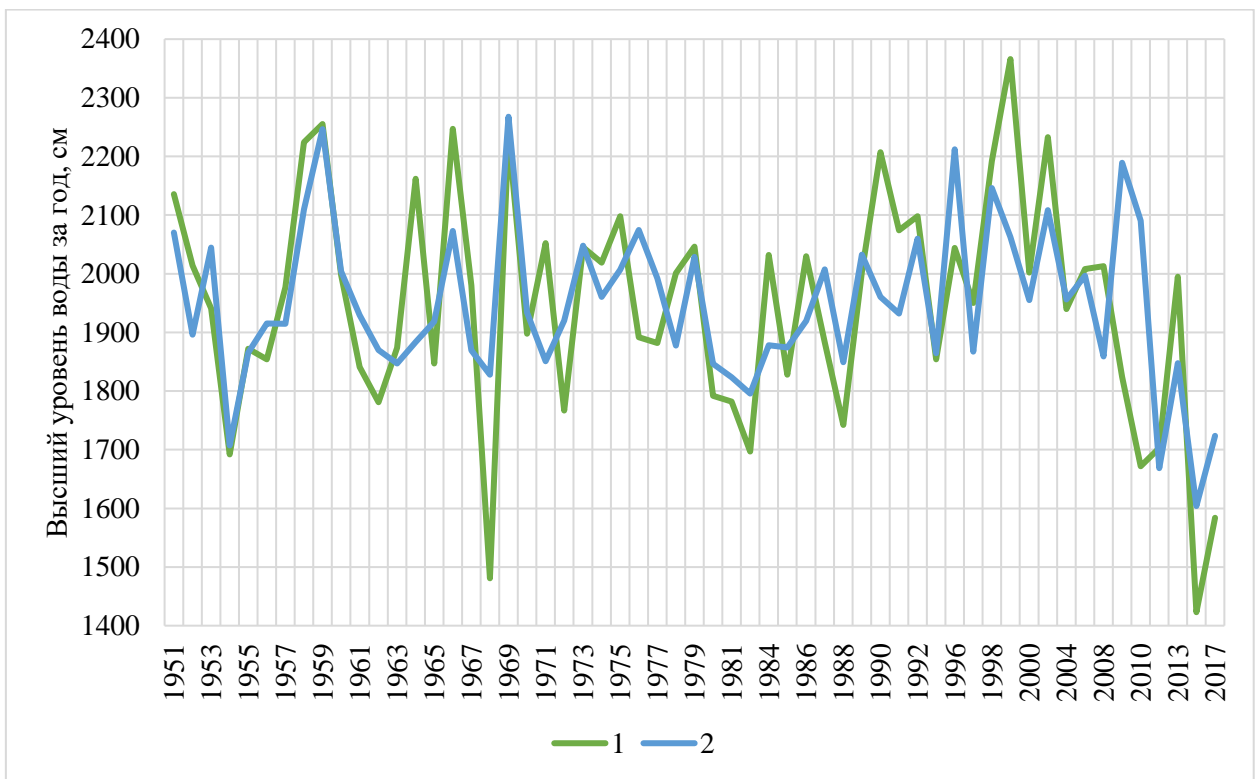


Рисунок 5.4. Результаты прогнозирования высшего уровня воды за год в с. Курейка (1 – наблюдаемые значения, 2 – прогнозные значения)

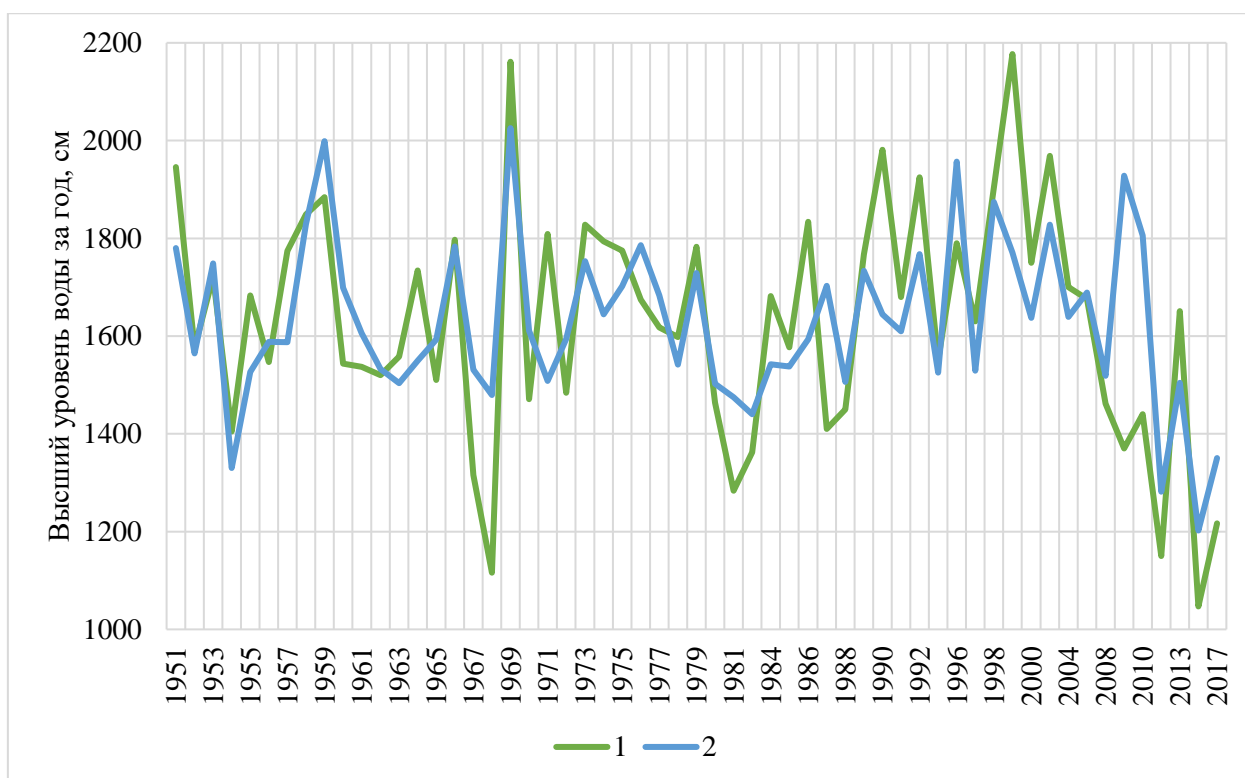


Рисунок 5.6. Результаты прогнозирования высшего уровня воды за год в г. Игарка (1 – наблюдаемые значения, 2 – прогнозные значения)

На представленных выше рисунках показан ход прогнозных и наблюдаемых значений высших уровней воды за год на контрольных постах нижнего течения реки Енисей. Как можно увидеть на полученных графиках хода, амплитуда колебаний фактических (наблюденных) значений высших уровней воды за год больше, чем прогнозных. Можно предположить, что подобный ход связан с влиянием построенной в 1967 году Красноярской ГЭС. После её заполнения ледовый режим вниз по течению Енисея от г. Красноярска изменился, и скорее всего, в 1968 году, когда наблюдается наиболее резкое уменьшение высшего уровня воды за год по сравнению с предыдущими и последующими годами, волны половодья были наиболее низкими и распространялись вниз по течению от г. Красноярска и не поднимались выше определенного уровня даже в самом устье реки.

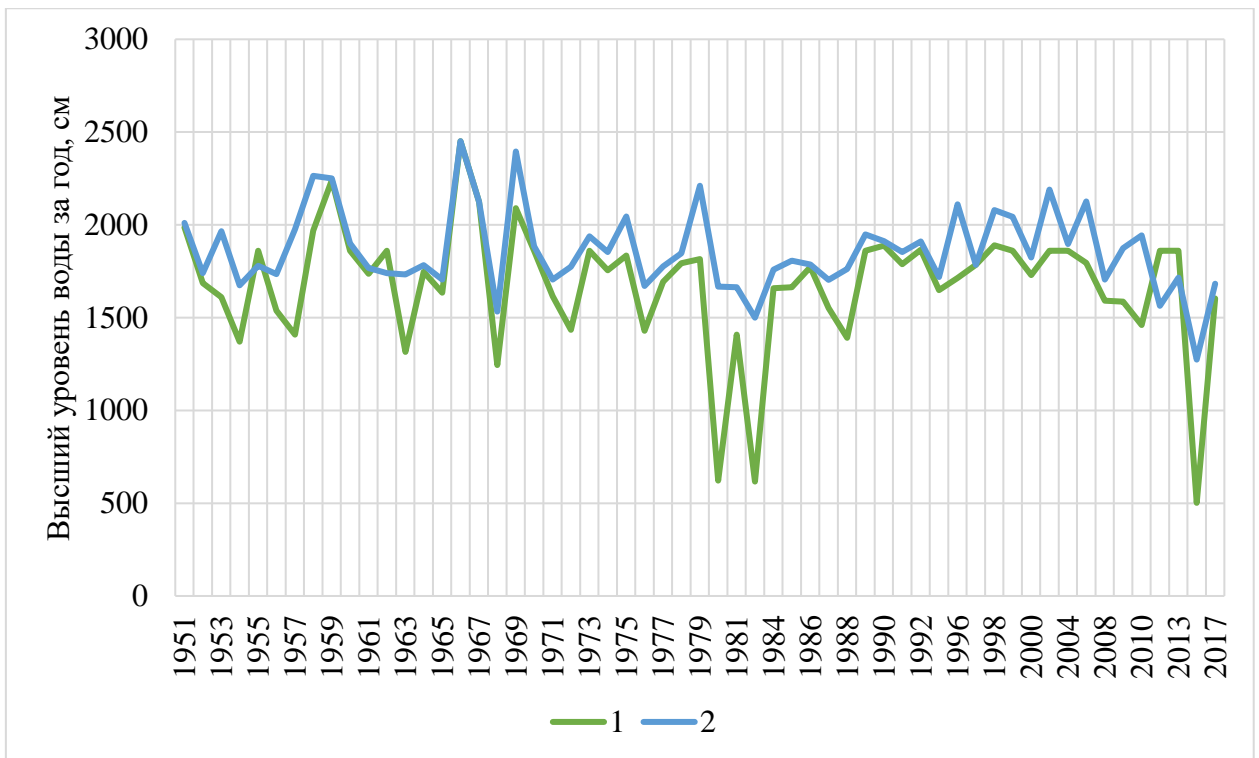


Рисунок 5.7. Результаты прогнозирования высшего уровня воды за год в с. Верещагино (1 – значения на дату выпуска прогноза, 2 – прогнозные значения)

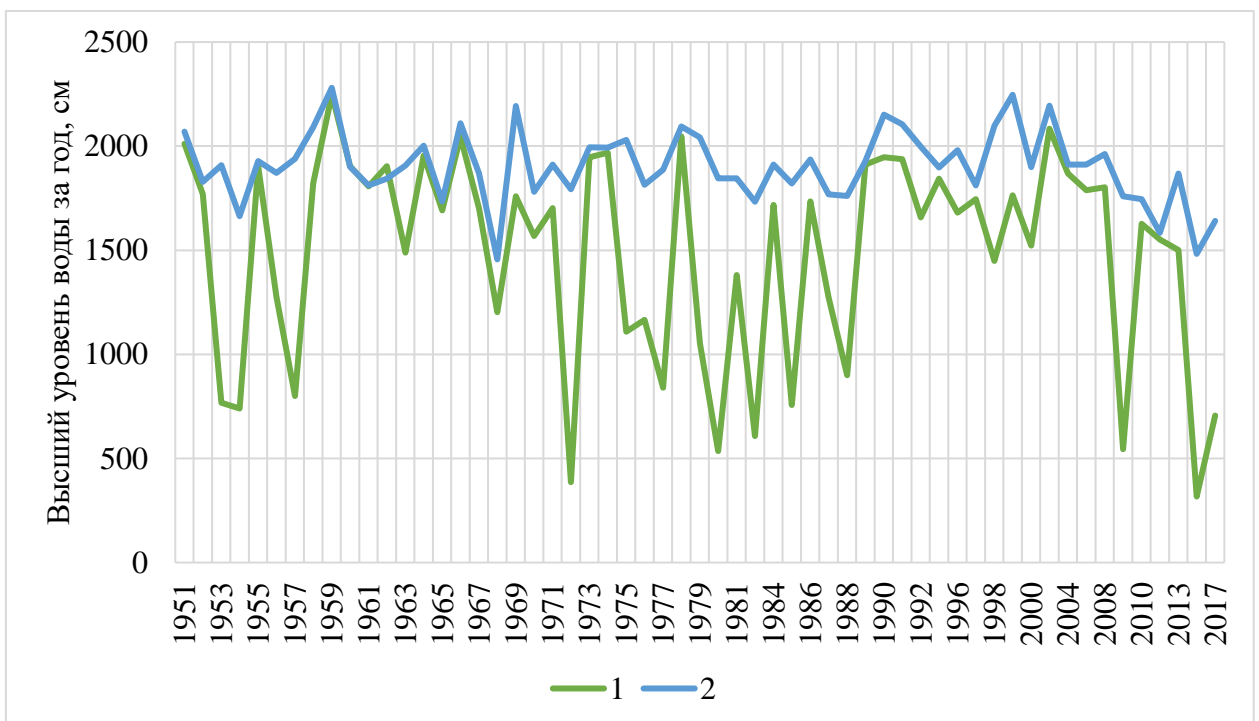


Рисунок 5.8. Результаты прогнозирования высшего уровня воды за год в с. Селиваниха (1 – значения на дату выпуска прогноза, 2 – прогнозные значения)

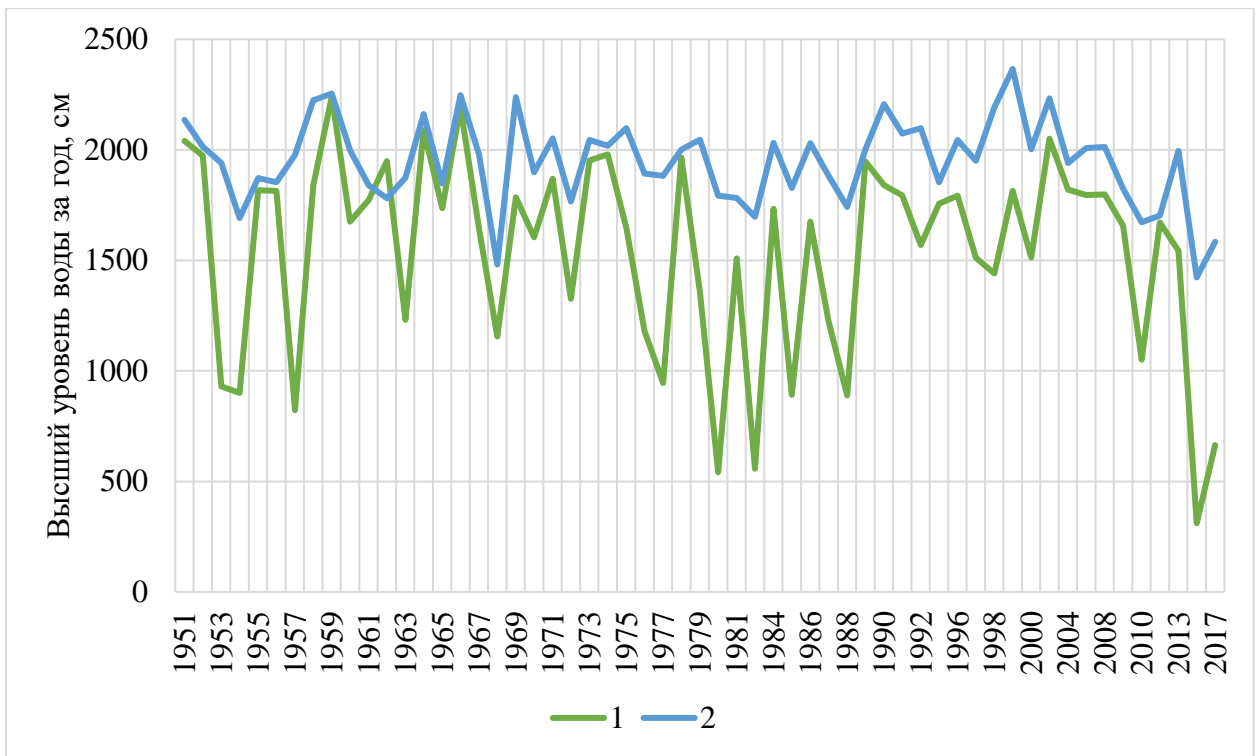


Рисунок 5.9. Результаты прогнозирования высшего уровня воды за год в с. Курейка (1 – значения на дату выпуска прогноза, 2 – прогнозные значения)

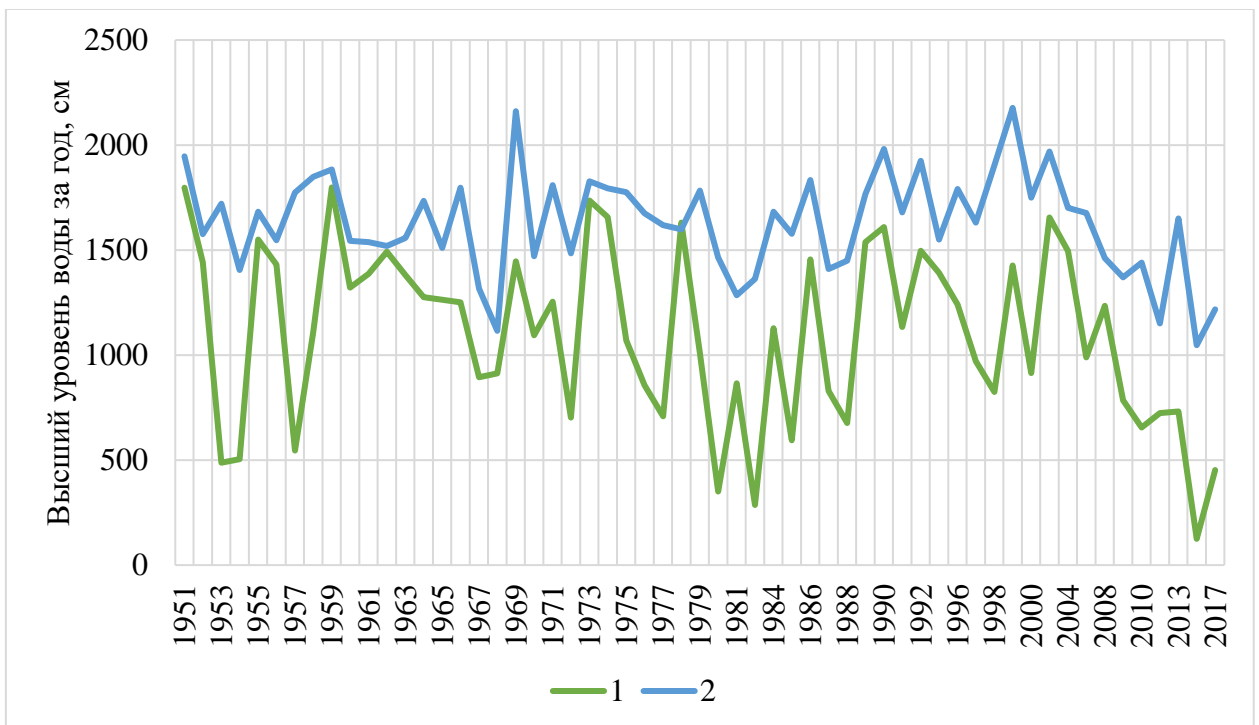


Рисунок 5.10. Результаты прогнозирования высшего уровня воды за год в г. Игарка (1 – значения на дату выпуска прогноза, 2 – прогнозные значения)

На рисунках выше представлены графики хода прогнозных значений высших уровней воды за год и на дату выпуска прогноза на контрольных постах нижнего течения реки Енисей. Можно заметить, что значения на дату выпуска прогноза меньше, чем прогнозные, и амплитуда их колебаний намного больше, чем прогнозных.

Прогнозные значения высших уровней воды за год независимого материала (с. Потапово) и наблюдаемые их значения также были приведены в графический вид (рис. 5.11).

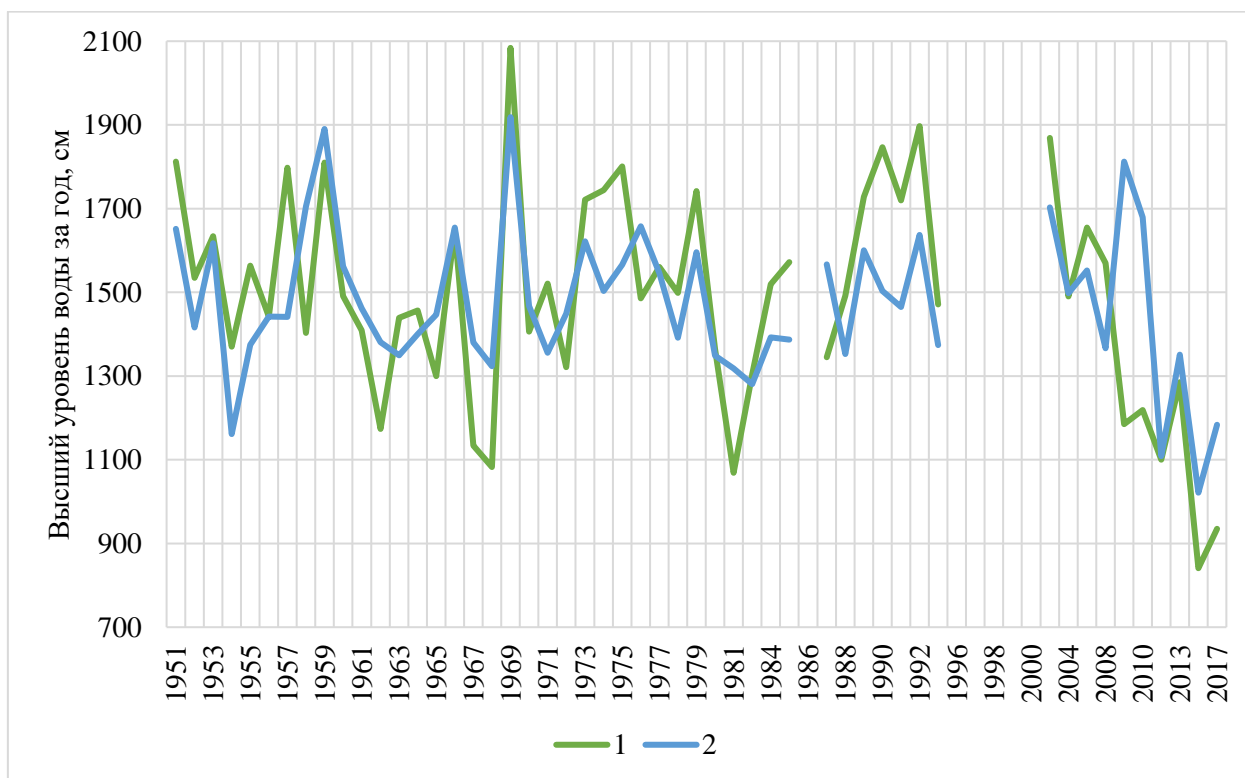


Рисунок 5.11. Результаты прогнозирования высшего уровня воды за год в с. Потапово (1 – наблюдаемые значения, 2 – прогнозные значения)

Отсутствие данных по высшим уровням воды за год в с. Потапово связано с тем, что наблюдения в эти года не велись.

Для независимого материала также были приведены значения высших уровней воды на дату выпуска прогноза, графически это представлено на рисунке 5.12.

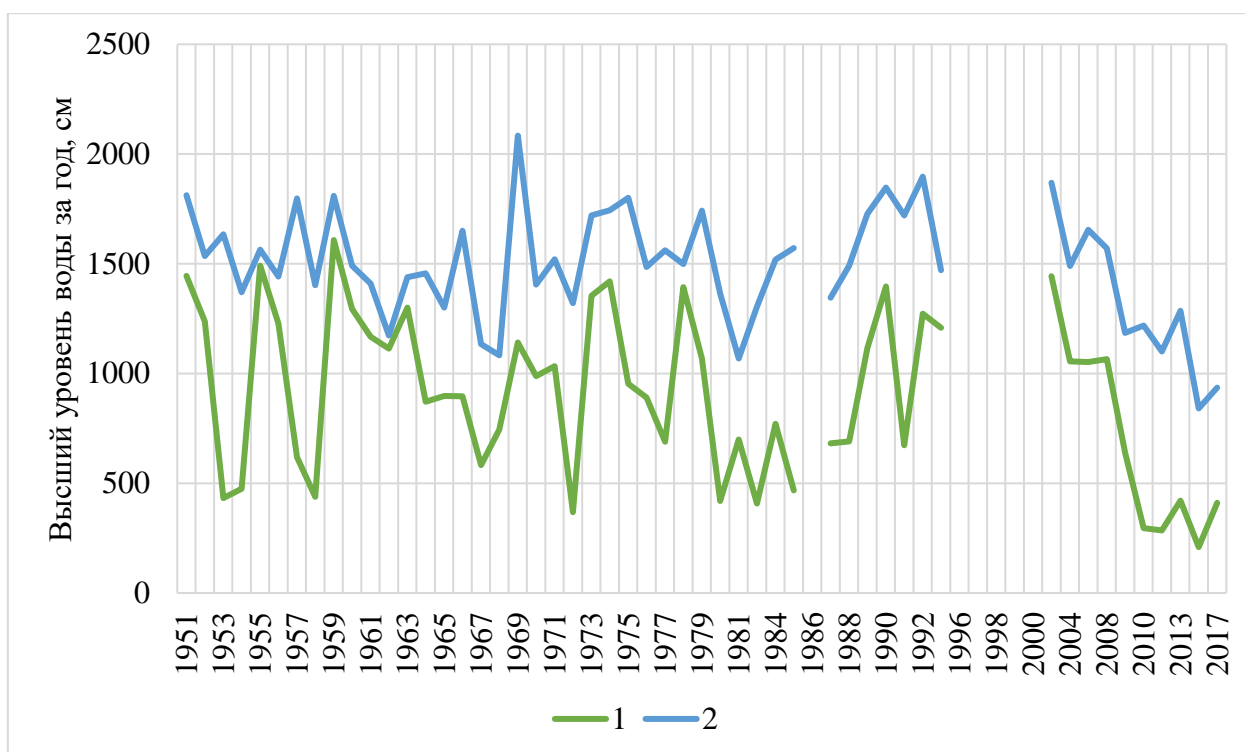


Рисунок 5.12. Результаты прогнозирования высшего уровня воды за год в с. Потапово (1 – значения на дату выпуска прогноза, 2 – прогнозные значения)

Как было сказано выше для контрольных гидрологических постов, прогнозные значения высших уровней воды за год в с. Потапово имеют меньшую амплитуду колебаний, чем значения, приходящиеся на дату выпуска прогноза.

Качество полученных прогнозных значений высших уровней воды за год было оценено на независимом материале (табл. 5.1) и по данным контрольных постов (табл. 5.2).

Таблица 5.1. Оценка качества выпускаемых прогнозов на независимом материале

Г/п	с. Потапово
σ_x , см	261
$\bar{H}_{\text{высш}(x)}$, см	1488
S, см	200
S/ σ	0,77

Таблица 5.2. Оценка качества выпускаемых прогнозов по данным контрольных постов

Г/п	с. Верещагино	с. Селиваниха	с. Курейка	г. Игарка
σ_x , см	219	170	193	240
$\bar{H}_{\text{высш}(x)}$, см	1860	1904	1949	1630
S, см	135	126	143	172
S/ σ	0,62	0,74	0,74	0,72

Числовая оценка эффективности разработанного метода прогнозирования (5.1) производилась с помощью отношения S/σ , представленного в таблицах 5.1 и 5.2. Полученные соотношения средней квадратической ошибки и среднего квадратического отклонения предсказываемой переменной от нормы говорят о высоком качестве выпускаемых прогнозов, так как все отношения S/σ меньше 0,80.

На рисунках 5.5-5.8, как говорилось выше, представлены прогнозные значения высших уровней воды за год и их значения на дату выпуска прогноза по наблюдаемым данным. Для оценки качества на основе этих данных была рассчитана заблаговременность прогноза и соответствующая дата выпуска прогноза. Изменение предсказываемой переменной за период заблаговременности прогноза и её среднее изменение позволяют получить среднее квадратическое отклонение изменений переменной за период заблаговременности прогноза. Таким образом, получается отношение S/σ_{Δ} , которое для контрольных постов, как и отношение S/σ меньше 0,80 и для с. Селиваниха, с. Курейка и г. Игарка даже меньше 0,50, что свидетельствует о большей точности полученной методики прогнозов (табл. 5.3). Стоит отметить, что для с. Верещагино отношение S/σ_{Δ} чуть больше 0,50 и равно 0,62. Однако, учитывается сравнение с более строгим критерием оценки, которым является значение 0,80.

Для оценки оправдываемости каждого выпускаемого прогноза использовались допустимые ошибки, приведенные в таблицах 5.3 и 5.4.

Таблица 5.3. Оценка оправдываемости выпускаемых прогнозов контрольных постов в нижнем течении реки Енисей

Г/п	с. Верещагино	с. Селиваниха	с. Курейка	г. Игарка
S/σ_{Δ}	0,62	0,30	0,42	0,52
$\Delta_{\text{доп}}$, см	146	284	230	223
Оправдываемость, %	75	96	89	86

Таблица 5.4. Оценка оправдываемости выпускаемых прогнозов на независимом материале в нижнем течении реки Енисей

Г/п	с. Потапово
S/σ_{Δ}	0,67
$\Delta_{\text{доп}}$, см	202
Оправдываемость, %	60

По данным контрольных постов и независимого материала анализировалась оценка оправдываемости выпускаемых прогнозов. Для получения оправдываемости выпускаемых прогнозов использовались допустимые ошибки, которые сравнивались с ошибками прогнозов. Если ошибки прогноза в ряде данных оказывались меньше допустимых, то те случаи фиксировались, как удачные. Количество случаев, когда ошибка прогноза оказывалась меньше допустимой ошибки, делилось на общее количество прогнозов, а затем полученное значение умножалось на 100. Так, были получены значения оправдываемости выпускаемых прогнозов, которые представлены в таблицах выше. Для контрольных постов оправдываемость получилась больше 75%, для независимого материала равна 60%.

Таким образом, приведённая выше полученные результаты позволяют говорить об высокой эффективности предлагаемой методики.

Приведенную методику прогнозирования высшего уровня воды за год следует применять для гидрологических постов, на которых коэффициенты

корреляции между высшими уровнями воды за год и высшими ледоходными уровнями воды достаточно высоки ($>0,6$).

Заключение

В работе рассмотрены фазы ледового режима Ангаро-Енисейского бассейна за период наблюдений с 1950 года по 2019 год. Анализ многолетней вариации приземной температуры воздуха показал статистически значимое её увеличение за последние 39 лет.

Основные результаты данного исследования доказывают полное решение изначально поставленных задач и реализацию цели работы:

1. В ходе апробации гидрологических данных была создана база данных основных гидрологических характеристик ледового режима Ангаро-Енисейского бассейна, а именно рек Енисей и Ангара;

2. Совместный анализ метеорологической и гидрологической информации показал характерное влияние изменений климата на ледовый режим Ангаро-Енисейского бассейна. В ходе анализа было выявлено увеличение средней многолетней приземной температуры воздуха во всех районах исследуемого региона. Для весенних месяцев – март-май – зафиксировано статистически значимое увеличение приземной температуры воздуха. Выявленное увеличение температуры воздуха существенно влияет на фазы ледового режима рек Енисей и Ангара, это проявляется в уменьшении продолжительности ледостава за счёт смещения сроков его установления и окончания;

3. На основе классификации участков рек по условиям формирования высших уровней за период весеннего ледохода (Сумачев, 2022) была выведена классификация генезиса высших уровней воды за год, было выделено три основных участка рек исследуемого региона. Разработанная классификация позволила облегчить создание прогностической модели;

4. На основе полученной классификации участков рек по условиям формирования высших уровней воды за год была разработана стандартизованная формула, по которой предполагается прогнозирование высших уровней воды за год в нижнем течении реки Енисей. Анализ оценки качества и оправданности показал, что полученный метод имеет высокое качество и его использование

оправдано. В заключение, хотелось бы сказать, что полученные результаты свидетельствуют об эффективности разработанной методики прогнозирования.

Список использованной литературы

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории РФ (2014).
2. Гельфан А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Мотовилов Ю.Г., Гусев Е.М. (2021) Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз. – Фундаментальная и прикладная климатология, т. 7, № 1, с. 36-79.
3. Водные ресурсы и их использование / Под ред. Проф. И. А. Шикломанова. – СПб.: Государственный гидрологический институт. 2009. – 600 с., ил.
4. Георгиевский В. Ю., Коронкевич Н. И., Алексеевский Н. И. Водные ресурсы и гидрологический режим рек РФ в условиях изменения климата //Тезисы пленарных докладов VII Всероссийского гидрологического съезда. СПб.: Гидро-метеоиздат. – 2013. – С. 26-32.
5. Ковшова Е. П. Исследование и прогноз элементов ледового режима реки Енисей в осенне-зимний период в нижнем бьефе Красноярской ГЭС: дис. – Институт географии им. ВБ Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук, 2009.
6. Шевнина Е. В. МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ И МЕТОДЫ ПРОГНОЗА СРОКОВ НАЧАЛА И ДОСТИЖЕНИЯ МАКСИМУМА ПОЛОВОДЬЯ НА УСТЬЕВОМ УЧАСТКЕ РЕКИ ЕНИСЕЙ //АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ. – 2008. – С. 57.
7. «Гидрологические ежегодники» с 1950 года по 2018 года по бассейну рек Енисей и Ангара. – ФГБУ «ГГИ».
8. ВНИИГМИ-МЦД – Температура воздуха (месячные данные). URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=8> (дата обращения: 5.11.2021)

9. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 16. Вып. 1 / Под ред. канд. геогр. наук А. П. Муранова. – Ленинград.: Гидрометеиздат. 1973.
10. Бабкин В. И., Постников А. Н. Циклонические осадки и сток Оби и Енисея в маловодные и многоводные годы // Метеорология и гидрология. – 2002. – №. 12. – С. 79-85.
11. IPCC: Climate Change 1995: The Science of Climate Change / (Eds.) J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, K. Maskell. — Contribution of Working Group I to the 2 nd Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. — Cambridge: UK, Cambridge University Press, 1995.
12. IPCC: Climate Change: The scientific Basis / Eds. J. T. Houghton, Y. Dung, D. J. Griggs, M. Nougier, P. J. Van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C. A. Johnson. Contribution of Working Group I to the 3 rd Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. — Cambridge: UK, Cambridge University Press, 2001.
13. IPCC. Fourth Assessment Report. Working Group I. Climate Change. The Physical Science Basis. Presented on IPCC Conference in Paris 02 February, 2007. — Paris, 2007.
14. Георгиевский В. Ю., Ежов А. В., Шалыгин А. Л. Оценка изменений стока рек под влиянием хозяйственной деятельности и глобального потепления климата// Докл. междунар. симпозиума «Расчеты речного стока». - ЮНЕСКО. - 1997.-С. 75-81.
15. Георгиевский В. Ю., Ежов А. В., Шалыгин А. Л., Шикломанов И. А., Шикломанов А. И. Оценка влияния возможных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек территории бывшего СССР // Метеорология и гидрология. — 1996. — № 11. - С. 89-99.
16. Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю. Влияние антропогенных факторов на сток рек бывшего СССР // Географические направления в гидрологии. — М.: Изд-во РАН, 1995.-С96-107.

17. Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю. Сток реки Волги и уровни Каспийского моря: влияние естественных и антропогенных факторов // Междунар. науч.-про-мышл. форум «Великие реки 2000». — Н. Новгород, ННГАСУ, 2000. - С. 45-48.
18. Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю. Влияние антропогенных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы // Изменения климата и их последствия. — СПб.: Наука, 2002. — С. 152— 164.
19. Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю. Влияние климатических изменений на водные ресурсы и водный режим рек России//Тезисы докл. Всемирной конф. по изменению климата. Москва, 29 сентября — 3 октября. — 2003. — С. 250.
20. Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю. Изменение стока рек России при глобальном потеплении климата// Тезисы докл. VI Всерос. гидрологич. съезда, 28 сентября — 1 октября 2004 г. С.-Петербург, секц. 3. — СПб.: Гидрометеиздат, 2004. — С. 200— 201.
21. Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю., Шалыгин А. Л. Причины повышения уровня Каспийского моря // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. — СПб.: Гидрометеиздат, 2003. — С. 254—266.
22. Балек К. Применение стохастической теории для долгосрочного прогнозирования среднегодового стока //Статистические методы в гидрологии. Л.: Гидрометеиздат. – 1970. – С. 241.
23. Алехин Ю. М. Статистические прогнозы в геофизике:(Динамико-статистический метод прогноза геофизических макропроцессов). – ЛГУ, 1963.
24. Boykoff M. T., Boykoff J. M. Balance as bias: Global warming and the US prestige press //Global environmental change. – 2004. – Т. 14. – №. 2. – С. 125-136.

25. Обзор состояния системы гидрологических наблюдений, обработки данных и подготовки информационной продукции в 2019 году. Санкт-Петербург 2020 — ФГБУ «ГГИ»
26. Обзор состояния системы гидрологических наблюдений, обработки данных и подготовки информационной продукции в 2020 году. Санкт-Петербург 2021 — ФГБУ «ГГИ»
27. Обзор состояния системы гидрологических наблюдений, обработки данных и подготовки информационной продукции в 2021 году. Санкт-Петербург 2022 — ФГБУ «ГГИ»
28. Наводнения в истории Красноярского края. Краевое государственное казённое образовательное учреждение «Учебно-методический центр по гражданской обороне, чрезвычайным ситуациям и пожарной безопасности Красноярского края». – 2011.
29. Бузин В. А. Зажоры и заторы льда на реках России. – 2015.
30. Попов Е. Г. Гидрологические прогнозы. 2-ое изд. – 1979.
31. Евстигнеев В. М., Магрицкий Д. В. Речной сток //Методические основы современной практики гидрологических расчетов. М.: Изд-во Триумф. – 2016.
32. Сумачев А. Э. Совершенствование методов прогнозирования характеристик ледового режима рек бассейнов Баренцева и Белого морей.
33. Руководство по гидрологической практике (ВМО-№ 168), Том II – Управление водными ресурсами и практика применения гидрологических методов, –2012 –С.324

Приложения

Приложение 1. Статистические характеристики многолетних рядов наблюдений за ледовым режимом рек

Таблица 1. Статистические характеристики основных элементов ледового режима по опорным гидрологическим постам на реках Енисей и Ангара

Река	ГП	Начало ледовых явлений			Первый день ледостава			Максимальная толщина льда		Продолжительность ледостава, дни		
		Даты 1950-1981	Даты 1981-2019	Δ	Даты 1950-1981	Даты 1981-2019	Δ	T ₁₉₅₀₋₂₀₁₈ , см	R	1950-1980	1981-2019	Δ
Енисей	г. Кызыл	23 октября	28 октября	5	19 ноября	21 ноября	2	135	-0,6	155	145	10
	с. Подсинее	31 октября	15 января	75	16 ноября	26 января	70	134	-0,7	160	33	127
	г. Красноярск	3 ноября	4 января	62	15 ноября			117	-0,3	164		
	с. Казачинское	7 ноября	21 ноября	13	9 декабря	2 января	23	73	-0,1	122	78	44
	г. Енисейск	24 октября	26 октября	2	29 ноября	18 декабря	18	82	-0,2	144	102	42
	с. Назимово	25 октября	31 октября	6	22 ноября	8 декабря	16	86	-0,5	159	135	24
	с. Ярцево	23 октября	25 октября	2	17 ноября	1 декабря	14	87	-0,5	168	149	19
	д. Бахта	17 октября	18 октября	1	12 ноября	19 ноября	7	91	-0,6	179	160	19
	с. Верещагино	15 октября	18 октября	3	6 ноября	9 ноября	3	96	-0,6	192	174	18
	с. Селиваниха	13 октября	17 октября	4	31 октября	4 ноября	4	91	-0,3	199	184	15
	с. Курейка	17 октября	18 октября	1	25 октября	30 октября	5	92	-0,3	208	188	20
	г. Игарка	16 октября	16 октября	0	20 октября	22 октября	2	96	-0,5	218	200	18
	с. Потапово	15 октября	17 октября	2	20 октября	24 октября	4	131	-0,4	223	197	27
	г. Дудинка	17 октября	18 октября	1	21 октября	24 октября	3	137	-0,1	224	205	19
с. Караул	11 октября	16 октября	5	19 октября	22 октября	3	138	-0,4	231	208	23	
Ангара	с. Богучаны	20 октября	26 октября	6	11 ноября	25 ноября	14	102	-0,5	179	153	27
	д. Каменка	18 октября	22 октября	4	9 ноября	19 ноября	10	95	-0,3	181	154	28

Приложение 2. Корреляционная связь многолетних рядов наблюдений за ледовым режимом рек

Таблица 1. Корреляционная связь между высшими предледоходными уровнями воды и высшими ледоходными, высшими уровнями за год для опорных гидрологических постов рек Енисей и Ангара

Высший предледоходный уровень воды (R)	Высший ледоходный уровень воды (R)			Высший уровень воды за год (R)		
	с. Богучаны	д. Каменка	с. Караул	с. Богучаны	д. Каменка	с. Караул
с. Богучаны	0,69			0,76		
д. Каменка		0,69			0,85	
с. Караул			0,56			0,58

Таблица 2. Корреляционная связь между высшими уровнями воды за год для опорных гидрологических постов реки Енисей

Высший уровень воды за год (R)	д. Бахта	с. Верещагино	с. Селиваниха	с. Курейка	г. Игарка	с. Потапово	г. Дудинка
с. Верещагино	0,79						
с. Селиваниха	0,67	0,74					
с. Курейка	0,67	0,75	0,93				
г. Игарка	0,69	0,67	0,88	0,91			
с. Потапово	0,64	0,67	0,79	0,79	0,85		
г. Дудинка		0,65	0,80	0,78	0,85	0,87	
с. Караул		0,61	0,79	0,71	0,75	0,79	0,90

Таблица 3. Корреляционная связь между высшими ледоходными уровнями воды для опорных гидрологических постов реки Енисей

Высший ледоходный уровень воды (R)	с. Верещагино	с. Селиваниха	с. Курейка	г. Игарка	с. Потапово	г. Дудинка
с. Курейка	0,62	0,90				
г. Игарка		0,83	0,82			
с. Потапово		0,70	0,65	0,85		
г. Дудинка		0,69	0,62	0,82	0,87	
с. Караул		0,60		0,71	0,77	0,89

Таблица 5. Корреляционная связь между высшими уровнями воды за год и уровнями воды в первый день свободного русла для опорных гидрологических постов рек Енисей и Ангара

Высший уровень воды за год (R)	Уровень воды в первый день свободного русла (R)							
	д. Каменка	г. Енисейск	с. Назимово	с. Ярцево	с. Верещагино	с. Селиваниха	с. Курейка	г. Игарка
г. Красноярск	0,68							
г. Енисейск		0,68	0,65	0,65				
д. Бахта					0,63		0,63	
с. Верещагино					0,73		0,64	
с. Селиваниха						0,60	0,82	0,72
с. Курейка							0,91	0,65
г. Игарка							0,63	0,77

Таблица 6. Корреляционная связь между высшими уровнями воды за год, уровнями воды различных фаз ледового режима и максимальной толщиной льда для опорных гидрологических постов рек Енисей и Ангара

Река	Высший уровень воды за год (R)	Максимальная толщина льда (R)	Уровень воды в первый день свободного русла (R)	Высший заторный уровень воды (R)	Высший ледоходный уровень воды (R)	Высший предледоходный уровень воды (R)
Енисей	г. Кызыл	0,23	0,21	-0,18	0,15	0,03
	с. Подсинее	0,12	0,11	-0,55	0,01	0,12
	г. Красноярск	0,18	0,56	0,85	0,69	0,38
	с. Казачинское	0,18	0,43	0,87	0,40	-0,18
	г. Енисейск	-0,01	0,55	0,14	0,71	-0,01
	с. Назимово	0,19	0,18	0,97	0,35	0,20
	с. Ярцево	0,08	0,18	0,95	0,91	0,37
	д. Бахта	0,44	0,50	0,55	0,80	0,36
	с. Верещагино	0,19	0,73	0,45	0,91	0,39
	с. Селиваниха	0,35	0,60	0,42	0,88	-0,02
	с. Курейка	0,40	0,91	0,48	0,89	-0,12
	г. Игарка	0,34	0,77	0,38	0,98	0,05
	с. Потапово	0,37	0,51	0,85	1,00	0,34
	г. Дудинка	0,36	0,43	0,77	1,00	0,27
	с. Караул	0,34	-0,03	-	1,00	0,59
Ангара	с. Богучаны	0,60	0,23	1,00	0,94	0,67
	д. Каменка	0,24	0,43	0,97	0,90	0,80

Таблица 7. Корреляционная связь между высшими уровнями воды за год и высшими ледоходными уровнями воды для опорных гидрологических постов реки Енисей

Высший уровень воды за год (R)	Высший ледоходный уровень воды (R)					
	с. Селиваниха	с. Курейка	г. Игарка	с. Потапово	г. Дудинка	с. Караул
д. Бахта	0,61	0,59	0,68	0,65	0,56	
с. Верецагино	0,72	0,68	0,67	0,69	0,66	0,58
с. Селиваниха		0,76	0,85	0,80	0,80	0,78
с. Курейка			0,89	0,81	0,78	0,70
г. Игарка				0,86	0,84	0,75
с. Потапово					0,87	0,78
г. Дудинка						0,89