

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Кириллина Кюннэй Святославовна

РАЗРАБОТКА РЕГИОНАЛЬНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ
РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

25.00.30 - Метеорология, климатология, агрометеорология

Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
Лобанов Владимир Алексеевич

Санкт-Петербург – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	4
1 Предлагаемая методика исследований	9
1.1 Краткая характеристика природно-климатических и социально-экономических особенностей Республики Саха (Якутия)	9
1.2 Обзор организационной деятельности в рамках проблемы современного изменения климата	11
1.3 Краткий обзор современных изменений климата на территории Земли, России и Якутии	13
1.4 Обзор по стратегиям смягчения и адаптации к последствиям климатических изменений	17
1.5 Методика исследований для формирования региональной климатической программы	24
2 Оценка современных изменений климата на территории Республики Саха (Якутия)	27
2.1 Формирование и анализ качества региональной базы данных	27
2.2 Оценка климатических изменений температур воздуха и их пространственное обобщение	41
2.3 Климатические изменения осадков и их пространственное обобщение	51
2.4 Оценка устойчивости полученных изменений	58
3 Оценка будущих изменений климатических характеристик и их возможного воздействия на основные отрасли экономики Республики Саха (Якутия)	61
3.1 Стратегия оценки возможных будущих изменений климатических характеристик на основе сценариев и моделей	61
3.2 Выбор эффективной климатической модели для температуры воздуха	62
3.3 Полученные сценарные показатели климатических изменений для территории Республики Саха (Якутия) и оценка их эффективности и надежности для температуры воздуха	72
3.4 Выбор эффективной климатической модели и прогноз для осадков	74
4 Примеры оценки динамики климатических индикаторов на территории Якутии	81
4.1 Динамика пожаров на территории Республики Саха (Якутия)	82
4.2 Динамика температуры почвы на территории Республики Саха (Якутия)	87
4.3 Динамика характеристик максимального стока на реках республики	92

4.4	Выводы по климатическим индикаторам	95
5	Разработка региональной климатической программы для Республики Саха (Якутия)	96
5.1	Анализ предполагаемых последствий влияния изменения климата для экономики, инфраструктуры и населения Республики Саха (Якутия)	96
5.2	Оценка уязвимости экосистем Республики Саха (Якутия) на возможные климатические воздействия	97
5.3	Разработка региональных стратегий смягчения последствий и адаптации к изменениям климата экономики, инфраструктуры и населения Республики Саха (Якутия)	99
5.4	Макет Климатической программы для Республики Саха (Якутия)	105
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	110
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	112

ВВЕДЕНИЕ

Изменение климата и его последствия для окружающей среды, экономики и общества являются одной из наиболее актуальных научных проблем современности. Тот факт, что климат Земли меняется ни у кого не вызывает сомнений. Уже сейчас необходимо начать принимать соответствующие меры реагирования к наблюдаемым и прогнозируемым в будущем климатическим изменениям. Разработка и своевременное принятие подобных стратегий по смягчению последствий изменения климата и адаптации к ним комплексного характера – важное условие для благополучного развития регионов в условиях меняющегося климата. В будущем такие комплексные климатические стратегии должны стать неотъемлемым элементом региональных программ социально-экономического развития и программ развития отдельных секторов экономики любой страны мира.

Степень разработанности темы исследования. В последнее время климат России, являясь частью глобальной климатической системы, испытывает очевидные изменения и все чаще становится объектом крупных международных научно-исследовательских проектов. Интерес, который вызывает территория нашей страны, объясняется не только ее размерами. Большая часть территории России находится в высоких широтах Северного полушария, где, согласно, данным наблюдений, в настоящее время происходят наиболее значительные изменения климата. Существуют также основания считать, что происходящие под влиянием климата изменения криосферы, гидрологического цикла, растительности и т.п. на территории России могут оказаться климатически значимыми далеко за ее пределами. В свою очередь, глобальные изменения климата привели на территории нашей страны к заметным последствиям в жизнедеятельности человека. В последние десятилетия происходит вынужденная адаптация человека к новым условиям среды обитания. Что несомненно вызвало интерес научной общественности и рост количества публикаций по теме исследования как среди российских, так и зарубежных ученых, особенно часто к теме адаптации к изменению климата обращаются канадские исследователи, в России – наиболее известны публикации и научные доклады коллектива авторов Росгидромета. В регионе исследования наибольшее количество исследований в области оценки современных тенденций изменения климата принадлежат Институту мерзлотоведения Сибирского отделения Российской академии наук (далее СО РАН), социальные же аспекты адаптации изучались Институтом гуманитарных исследований и проблем малочисленных народов севера СО РАН, но комплексных исследований по оценке современного и будущего климата республики, вызываемых ими последствий для экономики, инфраструктуры и населения Якутии еще не проводилось. Что делает диссертационное действительно нужным и своевременным.

Данное диссертационное исследование посвящено разработке стратегии адаптации северного региона к изменению климата на примере крупнейшего субъекта Российской Федерации (далее РФ) – Республики Саха (Якутия), которое включает в себя изучение целого комплекса проблем, связанных с проявлениями современного изменения климата в Якутии, включая анализ современных тенденций изменения климата республики и их временной динамики, моделирование будущего климата и проведение комплексной оценки ожидаемых воздействий климатических изменений на экономическое развитие республики, экосистемы и население республики на основе климатических индикаторов, а также разработку конкретных предложений по созданию адаптационных стратегий для уязвимых секторов экономики региона.

Актуальность темы исследования не вызывает сомнений, т.к. оно лежит в русле реализации разработанной Росгидрометом и утвержденной Президентом Климатической доктрины РФ (п.44: «Реализация политики в области климата предполагает разработку на её основе федеральных, региональных и отраслевых программ и планов действий.»).

В соответствии с поставленной целью в ходе работы следует решить следующие задачи:

- Выполнить обзор организационной деятельности в рамках проблемы современного изменения климата и результатов оценки современных климатических изменений на территории Земли, России, Якутии, а также рассмотреть основные существующие подходы к стратегиям адаптации и смягчения последствий климатических изменений в разрезе проводимых мероприятий и их результатов.
- Представить комплексную оценку современных изменений климата на территории республики, включая процедуры выбора климатических характеристик, формирования и анализа качества созданной климатической базы данных и установления климатических тенденций и их пространственных обобщений.
- Смоделировать и оценить будущие изменения климатических характеристик и их возможное воздействие на основные отрасли экономики республики, включая разработку стратегии определения возможных будущих изменений климатических характеристик на основе сценариев и моделей, оценку их эффективности и надежности, а также выявление уязвимости климатических индикаторов к возможным климатическим изменениям.
- Разработать макет региональной климатической программы адаптации для Республики Саха (Якутия).

Что касается научной новизны, данное диссертационное исследование является первой попыткой сбора, обобщения и анализа имеющихся, но подчас разрозненных и несистематизированных данных о современных климатических изменениях и их воздействии на различные секторы экономики, экосистемы и население Якутии. В ходе исследования будут

выделены приоритетные секторы экономики региона, нуждающиеся в практической реализации конкретных адаптационных мер.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты оценки качества многолетних рядов температуры воздуха и атмосферных осадков на территории Якутии на основе анализа их однородности, восстановления пропусков и приведения непродолжительных временных рядов наблюдений к многолетнему периоду для проведения эффективного статистического моделирования;
- результаты моделирования многолетних временных рядов наблюдений за температурой воздуха и атмосферными осадками для выявления зон нестационарности;
- результаты построения пространственных статистических моделей климатических характеристик температуры воздуха и атмосферных осадков для территории Республики Саха (Якутия);
- выбор эффективной климатической модели и перспективная оценка будущих климатических условий на территории Якутии до конца 21 века из набора современных климатических моделей;
- оценка отклика климатических индикаторов на примере лесных пожаров (историческая динамика количества и площади выгоревшей территории по данным лесничеств, находящихся на территории Якутии), характеристик весеннего половодья (максимальный сток и максимальные уровни воды) и температуры почвы на разных глубинах (1,6, 2,4 и 3,2 м для отдельных выбранных станций) на современное потепление климата в Якутии;
- структура регионального плана адаптации к проявлениям современного изменения климата на примере Якутии.

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в разработке структуры регионального плана адаптационных мер, направленных на смягчение и адаптацию к последствиям современного изменения климата и аналитического аппарата по оценке современного и будущего климата на региональном уровне, включая разработку методики по оценке климатических индикаторов, на примере крупнейшего северного региона нашей страны, отличающегося специфическими природными и климатическими условиями, направленными на устойчивое развитие в условиях, диктуемых современным изменением климата и ухудшением экологической обстановки.

В свою очередь практическая значимость заключается в разработке способной к практической реализации климатической программы регионального уровня на примере Якутии для смягчения последствий и адаптации к ожидаемым климатическим изменениям, включая анализ предполагаемых последствий изменения климата на экосистемы и экономику республики.

Методы исследования. В аналитической части диссертационного исследования была использована следующая методология:

- статистические критерии Диксона, Смирнова-Граббса, Стьюдента и Фишера для оценки однородности экстремумов эмпирических распределений и стационарности средних значений, и дисперсий для многолетних рядов климатических параметров;
- методика восстановления пропусков и приведения непродолжительных временных рядов наблюдений к многолетнему периоду, основанная на уравнении множественной линейной регрессии между рассматриваемым непродолжительным рядом и более продолжительными рядами в пунктах-аналогах;
- метод оценки эффективности нестационарных моделей по отношению к стационарной, основанный на сравнении остаточных дисперсий моделей;
- уравнение простой линейной регрессии, лежащее в основе пространственной статистической модели, связывающей многолетнее климатическое поле с полем каждого года;
- интерполяционная пространственная модель для построения полей норм климатических характеристик и показателей эффективности нестационарных моделей.
- инструменты климатического моделирования, включая «Исторический эксперимент» и прогноз будущего климата на основе набора климатических моделей из проекта CMIP5.

Научная обоснованность и достоверность положений и полученных выводов подтверждается достоверной климатической информацией, которая была заложена в статистический анализ и климатическое моделирование, применением объективного и эффективного статистического инструментария в аналитической части диссертационного исследования и согласованностью полученных результатов исследования.

Личный вклад автора выражен в:

- проведенном сборе данных для создания региональной климатической базы данных по Республике Саха (Якутия) на основе метеорологических ежегодников для 96 станций, находящихся на территории Якутии, и информации по паводковой активности в Якутском управлении по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (далее ЯУГМС), сборе статистических данных по лесным пожарам в архивах Департамента по лесным отношениям Республики Саха (Якутия);
- создании региональной климатической базы данных по атмосферным осадкам и температуре воздуха за временной период с начала метеорологических наблюдений на территории Якутии до 2014 г.;
- проведению научного анализа и моделирования больших объемов климатической информации с помощью объективных, достоверных и эффективных широко применяющихся в зарубежной и отечественной науке статистических методов;
- подготовке аналитического материала по научной оценке современного потепления климата на территории Якутии и его проявлений на базе самостоятельно разработанной методики по оценке

климатических индикаторов на примере лесных пожаров, весеннего половодья и температуры почвы;

- разработке региональной климатической программы с помощью синтеза существующих методик для адаптации к проявлениям современного изменения климата;
- подготовке научных публикаций в соавторстве с научным руководителем диссертационного исследования, а также с российскими и зарубежными учеными, в рецензируемые научные журналы и представлении результатов исследований на различных научных конференциях и симпозиумах.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на заседаниях Итоговой секции РГГМУ в 2013–2017-х гг. Результаты диссертационного исследования были представлены на 4^х республиканских (Республика Саха (Якутия)), 2^х всероссийских и 5^и международных конференциях, а также на круглых столах научного профиля и научных семинарах. Работа получила Грант Президента Республики Саха (Якутия) для лучших аспирантов технических и технологических ВУЗ-в из Якутии, обучающихся за пределами республики (ежемесячная доплата к республиканской стипендии в течение 2015–2016-го учебного года), грантовую поддержку Правительства Санкт-Петербурга для аспирантов ведущих ВУЗ-в и НИИ Санкт-Петербурга и Ленинградской области (в 2014–2015-м учебном году), Президента РФ для обучения и проведения научных исследований за рубежом (в 2014–2015-м учебном году). В итоге была пройдена 10-месячная стажировка (октябрь 2015 – июль 2016 гг.) в Научно-исследовательском центре по изучению адаптации к изменению климата в одном из ведущих университетов Японии, Университете Кэйо. Результаты стажировки были представлены на Международной конференции по инженерным и естественным наукам в Киото, Япония, где была получена премия за лучшую исследовательскую работу. В 2016–2017-м учебном году было получено два тревел-гранта для участия в международных научно-практических конференциях: в апреле 2017 г. – в совместной конференции Университета Аляски Фэйрбенкс и НАСА по изучению влияния изменения климата на лесные пожары, и в августе 2017 г. в 21^М Международном гидрологическом симпозиуме, посвященном влиянию изменений климата на гидрологию северных рек.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 18 печатных работ, из них 5 в научных изданиях, находящихся в перечне ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 5-и глав и заключения. Объем работы составляет 118 страниц и включает 30 рисунков и 39 таблиц. Список литературы состоит из 80 наименований, как российских, так и зарубежных авторов.

1. Предлагаемая методика исследований

1.1 Краткая характеристика природно-климатических и социально-экономических особенностей Республики Саха (Якутия)

Природно-климатические условия Республики Саха (Якутия) характеризуются как экстремальные. Здесь накоплен уникальный опыт ведения промышленности и сельского хозяйства в экстремальных климатических условиях Севера, применены первые технологии жилищного строительства на вечной мерзлоте.

Якутия расположена в северо-восточной части Евразийского материка и является самым большим регионом России. Общая площадь континентальной и островной территории составляет 3,1 млн. кв. км. Свыше 40% территории республики находится за Полярным кругом.

Якутия характеризуется многообразием природных условий и ресурсов, что обусловлено физико-географическим положением ее территории. Большую часть занимают горы и плоскогорья, на долю которых приходится более 2/3 ее поверхности, и лишь 1/3 расположена на низменности.

Почти вся континентальная территория представляет собой зону сплошной многовековой мерзлоты, которая только на крайнем юго-западе переходит в зону ее прерывистого распространения [1].

Якутия – один из наиболее «речных» (700 тыс. рек) и «озерных» (свыше 800 тыс. озер) районов России, что определяет перспективы развития гидроэнергетики [2].

Климатические особенности Якутии в значительной мере определяются ее положением на северо-востоке Азии. Радиационные процессы, от которых главным образом зависит термический режим, обусловлены прежде всего широтой.

Климат Якутии суровый, резко континентальный. На равнинах отчетливо выражена широтная зональность, а в горах – высотная поясность. Продолжительность холодного времени (температура ниже 0 °С) – от 6 до 9 месяцев, с октября по апрель. В это время в виде снега выпадает от 10 до 30% годового количества осадков. Теплое время, хотя и короткое, но действительно теплое, даже жаркое, на него приходится от 70 до 90% годовых осадков. Переходные времена года – весна и осень – очень короткие, их продолжительность составляет от 15 до 35 дней.

Можно выделить три климатообразующих фактора, влияющих на климат Якутии. Географическое положение: Якутия расположена в высоких широтах, из-за этого в течение года неодинаково освещается солнечными лучами, что влияет на продолжительность дня по сезонам года.

Влияние рельефа: наличие открытых с севера меридионально вытянутых равнинных понижений, окаймленных горными системами, обуславливает застаивание холодного воздуха зимой. С юга горные системы Алданского и Колымского нагорий преграждают поступление тихоокеанских морских воздушных масс, что обуславливает крайнюю суровость климата Восточной Якутии.

Влияние общей циркуляции атмосферы: летом арктический фронт между арктическим воздухом (АВ) и воздухом умеренных широт (ВУ) расположен около 65° с.ш., а умеренный фронт между ВУ и тропическим воздухом (ТВ) проходит около 50° с.ш. Летом вторжение АВ вызывает похолодание и заморозки, а вторжение ТВ – очень жаркую и ясную погоду [3].

Современное состояние экономики Республики Саха (Якутия): республика расположена в континентальной и арктической частях Дальнего Востока и характеризуется экстремальными природно-климатическими условиями и низкой плотностью транспортно-коммуникационной инфраструктуры [4].

Республика является экономическим лидером Дальневосточного федерального округа, на нее приходится 29% объема промышленного производства федерального округа, а по объему экспорта она занимает второе место [5]. Основу экономики региона составляет экспортно-ориентированная промышленность. Структура Валового регионального продукта (ВРП) республики представлена ниже (Рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Отраслевая структура ВРП Республики Саха (Якутия)

Ключевыми отраслями экономики являются алмазодобывающая, золотодобывающая, угледобывающая, нефтедобывающая, газовая, алмазогранильная, ювелирная и лесоперерабатывающая.

На территории Якутии выявлено свыше 1500 месторождений различных видов минерального сырья. Значительны энергетические ресурсы республики [6].

Общая численность населения Якутии составила 958,5 тыс. человек. Удельный вес городского населения – 64,1%, сельского – 35,9%. Несмотря на обширную площадь, территория характеризуется слабой заселенностью. Одной из особенностей республики является исторически сложившийся большой удельный вес сельского населения в общем числе жителей (35,9% при среднем в других северных регионах России – 8%).

На характер расселения заметное воздействие оказывают природно-климатические и экономические факторы. Наибольшей плотностью населения отличаются улусы с относительно благоприятными условиями для ведения сельскохозяйственного производства Центральной Якутии, а также города Якутск и Нерюнгри с развитой промышленностью и транспортной схемой [1].

1.2 Обзор организационной деятельности в рамках проблемы современного изменения климата

Глобальное изменение климата и выработка политики, направленной на предотвращение его неблагоприятных последствий, относятся к числу наиболее острых проблем современности [7]. Сегодня в результате успехов, достигнутых в области науки о климате за последние 30 лет, значительно повысились возможности прогнозирования сезонной и межгодовой изменчивости климата Земли и подготовки проекций изменения климата для крупных регионов земного шара в масштабе столетий [8]. Работа в данном направлении активизировалась в 1988 г., когда мировое сообщество ученых объединило усилия по исследованию проблемы изменения климата и была создана Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК или IPCC) [9].

Чтобы замедлить рост или сократить выбросы парниковых газов, все государства должны разрабатывать и реализовывать свою климатическую политику. В настоящее время большинство развитых стран разрабатывают такую политику, в которой широко используются налоговые меры, нередко в сочетании с финансовыми стимулами, такими как гранты, льготные кредиты и тарифы. Наряду с этим ряд правительств ввели в действие национальные системы торговли квотами на выбросы. Местные органы власти, города и муниципалитеты имеют собственные программы деятельности [10].

Важной особенностью государственной климатической политики на национальном и международном уровнях является ее комплексность. В ней должны быть интегрированы следующие аспекты:

- формулирование комплекса целей и создание портфеля мер/ инструментов для каждого из всех важных с климатической точки зрения секторов экономики: от энергетики до управления отходами;

- вовлечение в разработку и реализацию политики региональных и местных органов власти, бизнеса и общественности;
- поэтапный подход к реализации;
- учет дополнительных и сопряженных затрат, и выгод;
- комбинация мер по смягчению последствий и по адаптации к изменению климата [11].

Национальная политика и меры в области климата в нашей стране разрабатываются и осуществляются в трех основных направлениях:

1. Целенаправленные мероприятия, обеспечивающие выполнение национальных обязательств по Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций по изменению климата (далее РКИК ООН) и Киотскому протоколу.
2. Национальные программы экономического и социального развития, предусматривающие комплекс мер по ограничению антропогенных выбросов парниковых газов, защите и повышению качества поглотителей и накопителей парниковых газов.
3. Другие национальные программы и мероприятия, реализация которых способствует снижению выбросов или повышению абсорбции парниковых газов, или адаптации к изменениям климата [12].

В период 2007–2009 гг. в России был принят ряд важных правительственных нормативных актов, направленных на реализацию мер в области смягчения изменения климата и адаптации к климатическим изменениям, в том числе:

- Указ Президента России от 4 июня 2008 г. № 889 «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики»;
- Концепция долгосрочного социально-экономического развития РФ до 2020 года;
- Постановление Правительства России №1-р от 08.01.2009 г. «Об основных направлениях государственной политики в сфере повышения энергоэффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2020 г.»;
- Климатическая доктрина РФ, 2009 г.

При этом наиболее важным из перечисленных выше законодательных актов является Климатическая доктрина РФ. Она по существу является политической декларацией государства, подчеркивающей глобальный характер интересов России в отношении изменений климата и их последствий. Научной основой доктрины являются фундаментальные и прикладные научные знания в области климата и смежных наук. Правовую основу Доктрины составляют Конституция страны, федеральные законы, указы Президента и нормативно-правовые акты Правительства.

Согласно Климатической доктрине формирование и реализация политики России в области климата предполагает разработку и реализацию соответствующей государственной

стратегии и на ее основе федеральных, региональных и отраслевых программ и планов действий [13].

Прямым и непосредственным следствием принятия Климатической доктрины явилась разработка и утверждение в 2011 г. Правительством РФ Комплексного плана ее реализации до 2020 г. [14], который задает основу для последующих федеральных и отраслевых программ и планов действий, дает детальное руководство о том, что конкретно, когда и каким федеральным ведомством должно быть сделано.

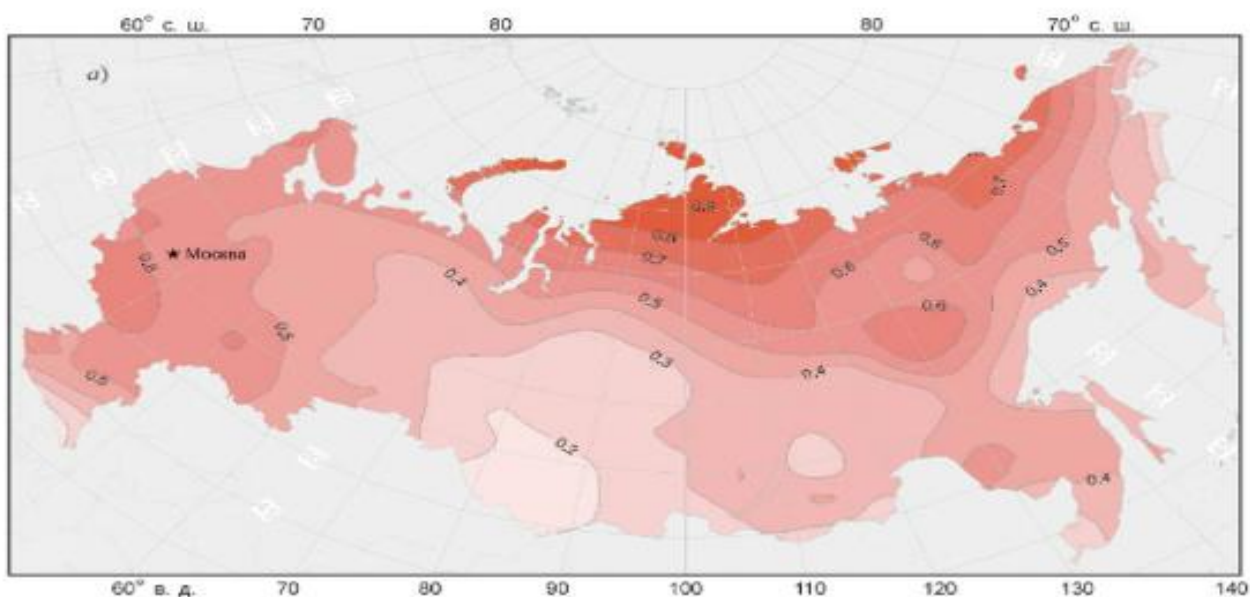
1.3 Краткий обзор современных изменений климата на территории Земли, России и Якутии

Климат Земли за столетие изменился как на глобальном, так и на региональном уровне, причем процесс изменений ускорился и стал мощнее в последние десятилетия [15].

Климат России, являясь частью глобальной климатической системы, испытывает очевидные изменения [16]. Начиная с середины 1970-х гг. средняя температура приземного воздуха на территории России повышается со средней скоростью $0,43^{\circ}\text{C}$ за десятилетие, что более чем в два с половиной раза превышает скорость глобального потепления.

Особенно значительные изменения климата наблюдаются в Арктике и субарктической зоне многолетней мерзлоты.

Во все сезоны, кроме зимнего, скорость потепления несколько увеличилась, а зимой, напротив, заметно уменьшилась (от $0,35$ до $0,18^{\circ}\text{C}/10$ лет). В целом за год и во все сезоны, кроме зимы, локальные оценки трендов положительны практически на всей территории страны и в целом для России уверенно указывают на продолжающееся потепление (Рисунок 1.2).



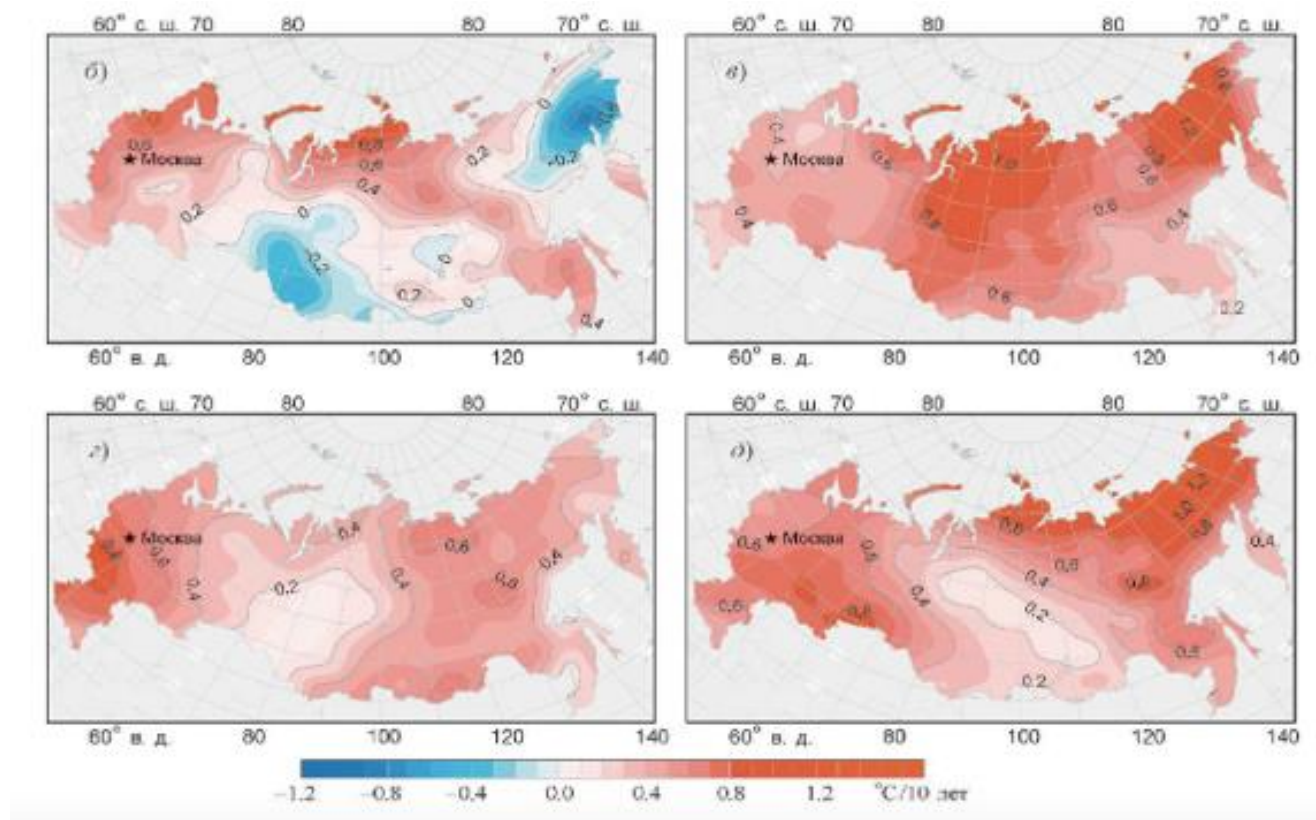


Рисунок 1.2 – Географическое распределение коэффициентов линейного тренда среднегодовой (а) и средней сезонной температуры (б-д) на территории России за 1976–2012-е гг.:

б) зима; в) лето; г) весна; д) осень, °C/ 10 лет

Тренд годовых сумм осадков за период 1976-2012 гг. на большей части территории России положителен. В среднем он составляет для месячных осадков 0,8 мм/ 10 лет. Изменения регионально осредненных годовых сумм осадков во всех регионах, за исключением Центральной Сибири, отмечаются на фоне интенсивных межгодовых флуктуаций.

На значительной территории Западной и Восточной Сибири, на побережье Охотского моря и юге Дальнего Востока, в центральных и северо-восточных областях Европейской части России за период 1966–2012 гг. обнаружена тенденция увеличения максимальной за зиму высоты снежного покрова.

В последние четыре десятилетия, по данным спутниковых наблюдений, площадь снежного покрова в переходные сезоны года на территории страны уменьшается.

Одним из важнейших последствий изменения климата является увеличение частоты и силы экстремальных явлений погоды.

Годовые минимумы и максимумы температуры воздуха увеличиваются на большей части территории России (Рисунок 1.3).

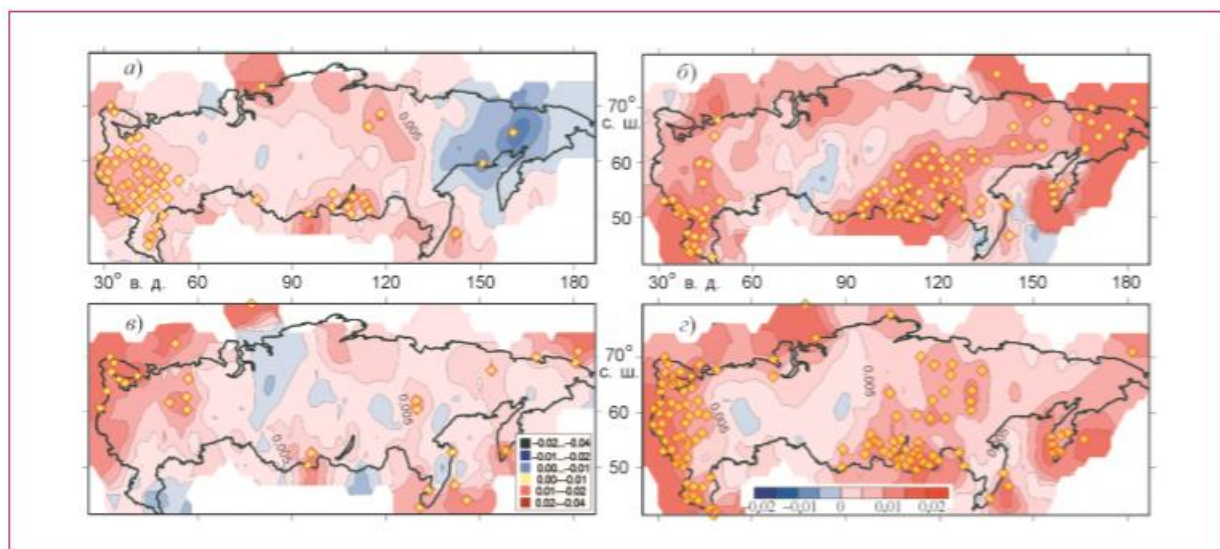


Рисунок 1.3 – Изменения процентилей P95 (а, б) и P5 (в, г) нормированной аномалии температуры зимой (а, в) и летом (б, г) (линейный тренд за 1976–2009-е гг.). Аномалии рассчитаны относительно годового хода за 1976–2009 гг. Шаг изолиний: 0,005 год⁻¹.

Желтым цветом выделены станции, где тренд значим на уровне 5%

Во все сезоны преобладает увеличение числа суток с аномально высокой температурой воздуха (наиболее заметное летом на Азиатской части России) и уменьшение числа суток с экстремально низкой ночной температурой воздуха. Суммарное число дней с морозом убывает в целом за год и в переходные сезоны почти повсеместно, особенно осенью. Число волн жары, их продолжительность и интенсивность в западной части страны во все сезоны имеют положительную тенденцию, а аналогичные характеристики волн холода – тенденцию к уменьшению.

Также отмечается увеличение показателей засушливости на большей части земледельческой зоны России. В большинстве регионов увеличивается число дней с экстремально малыми значениями влагосодержания пахотного слоя почвы [17].

Перейдем к оценке современных климатических изменений на территории изучаемого района – Республики Саха (Якутия).

В последние десятилетия изучение проблемы изменения климата достаточно широко проводятся Институтом мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской Академии Наук (ИМЗ СО РАН) и Институтом биологических проблем криолитозоны СО РАН (ИБПК СО РАН) в рамках международных программ по изучению динамики климата в области вечной мерзлоты и внутренних планов научно-исследовательских работ. Одновременно эти исследования являются частью программы по осуществлению государственной климатической политики Республики Саха. Проводились как общетеоретические исследования по проблеме глобального потепления [18; 19; 20], так и мерзлотно-климатические [21; 22; 23; 24; 25;

26; 27; 28] и экосистемные исследования [29]. Результаты многолетних исследований якутских ученых свидетельствуют о значительных изменениях в состоянии почвогрунтов, структуре и функционировании мерзлотных экосистем, и усилении экологической и биологической опасности для всех живых организмов, включая человека [30].

Ниже представим анализ изменения климата республики, подготовленный сотрудниками ИМЗ. Для анализа современной изменчивости климата Республики Саха (Якутия) были использованы данные основных климатических элементов (температура воздуха, осадки, снежный покров) по 45 метеостанциям за период с 1966 по 2010 гг. Начало периода обусловлено тем, что с 1966 г. Гидрометеослужба проводит наблюдения по единой методике и одинаковыми приборами (восемь сроков, поправки к измеренным осадкам).

Как свидетельствует анализ поля среднегодовой температуры воздуха, данный метеопараметр на исследуемой территории варьирует в широком диапазоне: от $-16,7$ (Оймякон) до $-5,6^{\circ}\text{C}$ (Витим). Особенностью резко континентального климата, свойственного практически всей территории Якутии, является высокая межгодовая изменчивость среднегодовой температуры воздуха. За рассматриваемый период вариации температуры воздуха в среднем на всех метеостанциях составили $4-5^{\circ}\text{C}$.

В период с 1966 по 1989 гг. потепление в Якутии проходило относительно плавно и характеризовалось практически зональным распределением приращения температуры.

В начале 1990-х гг. процесс потепления проявился более резко. Повышение температуры воздуха отмечается на всей территории Якутии, причем оно пространственно неоднородно: южнее 64° с.ш. приращение температуры воздуха составило $1,5-2^{\circ}\text{C}$ и более, а на северо-западе и северо-востоке Якутии – $0,5-1^{\circ}\text{C}$. Необходимо отметить, что подавляющий вклад в повышение среднегодовой температуры воздуха принадлежит зимам. Они стали теплее и особенно существенно – в Южной и Центральной Якутии.

Анализ поля тренда за 1966–2009-е гг. показал, что на всей территории Якутии отмечается тенденция к потеплению, также неоднородная в пространстве. Скорость тренда по региону изменяется от $0,16^{\circ}\text{C}/10$ лет (Саскылах) до $0,68^{\circ}\text{C}/10$ лет (Якутск). Максимальная скорость изменения температуры отмечена в Центральной Якутии, минимальная – в районах севернее широты 69° .

За исследуемый период увеличение осадков отмечается в Жиганске и Витиме (год и зима), Вилюйске (год), а уменьшение осадков фиксируется в Чокурдахе (год и зима) и в Верхоянске и Зырянке (зима). В остальных пунктах региона тренды незначительны и не являются статистически значимыми [30].

Картографические проекции изменений рассчитанных линейных трендов температуры воздуха и атмосферных осадков представлены ниже (Рисунки 1.4–1.5) [31; 32].

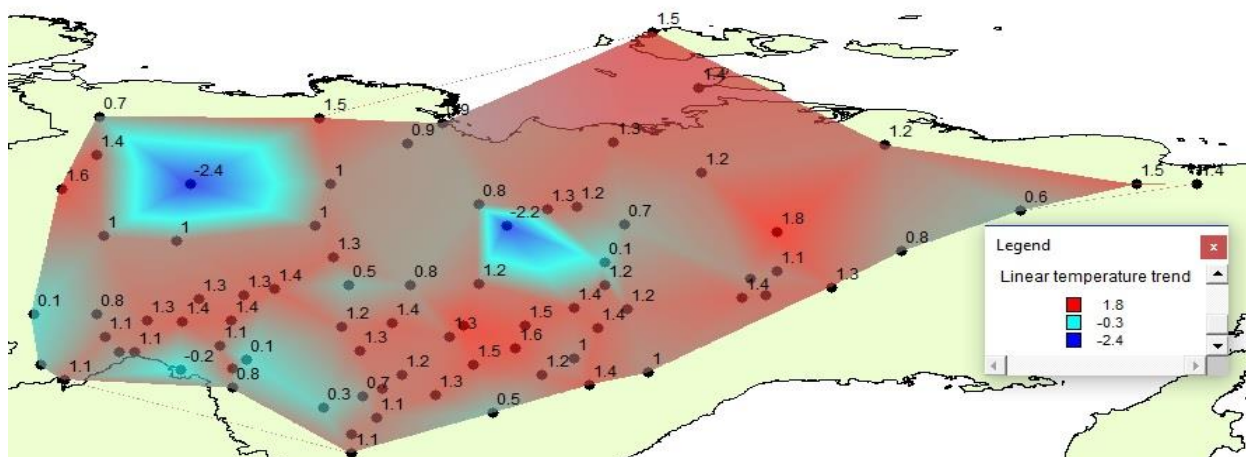


Рисунок 1.4 – Изменения среднегодовой температуры воздуха на территории Якутии за период 1961–2013, °С

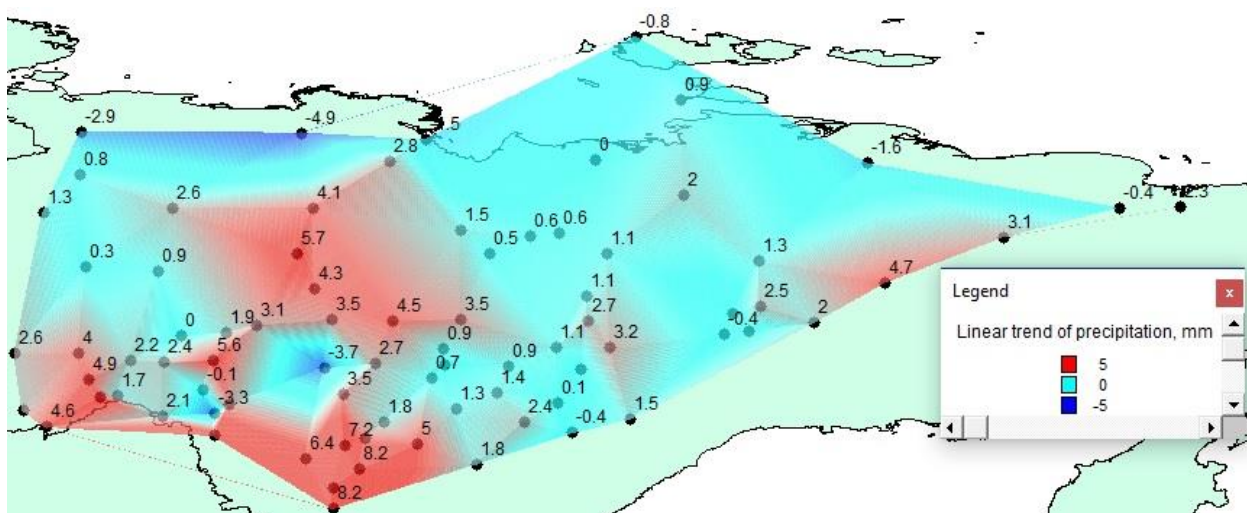


Рисунок 1.5 – Изменения среднегодовых значений атмосферных осадков на территории Якутии за период 1961–2013, мм

1.4 Обзор по стратегиям смягчения и адаптации к последствиям климатических изменений

Изменение климата обуславливает настоятельную необходимость разработки стратегии адаптации экономики к наблюдаемым и ожидаемым климатическим изменениям. Поскольку проблема адаптации является всеобщей, она нашла отражение в международной деятельности. Так, исполнительный совет Всемирной метеорологической организации (далее ВМО) в 2010 г. утвердил в качестве приоритетной тематическую область исследования «Климатическая информация для адаптации и учета факторов риска», в свою очередь в составе МГЭИК также была введена специальная рабочая группа, которая занимается проблемами адаптации [33].

Потери мировой экономики от воздействий изменения климата уже сейчас составляют триллионы долларов. Однако, в отличие от выбросов «обычных» загрязняющих веществ, выбросы парниковых газов нельзя запретить, как нельзя запретить мировую энергетику и транспорт. Решить проблему можно, лишь кардинально снизив выбросы, человечеству придется жить в новых условиях и адаптироваться к ним. Нужно адаптировать экономику, стиль жизни людей, нужно помочь экосистемам [34].

Согласно принятой терминологии МГЭИК адаптация определяется как «приспособление естественных или антропогенных систем в ответ на фактическое или ожидаемое воздействие климата, или его последствия, которое позволяет уменьшить вред или использовать благоприятные возможности». В свою очередь, под «смягчением последствий изменения климата понимается ограничение и сокращение антропогенных выбросов парниковых газов».

В области смягчения последствий изменения климата большинство стран мира придерживаются следующих стратегических принципов:

- политика снижения совокупных выбросов парниковых газов;
- государственная поддержка использования низкоуглеродных источников энергии;
- постепенная переориентация налогов на энергию с учетом углеродоемкости топлива и политика, направленная на налогообложение выбросов углерода для эксплицитного определения цены выбросов CO₂;
- внедрение систем торговли разрешениями на выбросы;
- проведение рядом стран реформ своей политики поддержки возобновляемой энергии через уменьшение использования специальных закупочных тарифов и рост использования премий на входе в сеть и конкурсных заявок;
- общемировой тренд на увеличение расходов на исследования, разработки и демонстрационные показы в области энергии, выделяемые на низкоуглеродные энергетические технологии, такие как хранение энергии, умные сети, передовые виды топлива и автомобилей, а также улавливание и хранение углерода [35].

В России меры по применению рыночных механизмов, постепенному сокращению или устранению рыночных диспропорций, фискальные и иные экономические стимулы являются неотъемлемой частью национальной политики и мер в области смягчения последствий изменения климата. К наиболее значимым законодательным и нормативным актам, вступившим в силу до 1 января 2010 г. и реализуемым в настоящее время или не имеющим ограничений срока действия, относятся:

- Распоряжение Правительства РФ о создании в целях реализации обязательств, вытекающих из Киотского протокола, Российского реестра углеродных единиц (2006);

- Распоряжение Правительства РФ о создании в целях реализации обязательств, вытекающих из Киотского протокола (статья 5, пункт 1), российской системы оценки антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом по веществам, разрушающим озоновый слой (2006);
- Постановление Правительства РФ о порядке утверждения и проверки хода реализации проектов, осуществляемых в соответствии со статьёй 6 Киотского протокола к Рамочной конвенции ООН об изменении климата (2007);
- Распоряжение Правительства РФ об упрощении процедуры утверждения, обеспечения реализации и осуществления контроля проектов, осуществляемых в рамках статей 6 и 17 Киотского протокола (2009);
- Распоряжение Правительства РФ об определении «Акционерного коммерческого Сберегательного банка РФ» организацией, уполномоченной участвовать в «торговле выбросами» парниковых газов для целей выполнения определенных количественных обязательств РФ по ограничению и сокращению этих выбросов (2009).

Для реализации механизмов гибкости Киотского протокола (статьи 6, 12 и 17) в 2010-2011-х гг. были приняты Федеральные законы, на основании которых внесены поправки в федеральный бюджет (Федеральный закон от 23 июля 2010 г. № 185-ФЗ) и Налоговый кодекс РФ (Федеральный закон от 19 июля 2011 г. № 245-ФЗ). В 2011 г. Правительство РФ установило лимит в размере 300 млн. единиц по операциям с единицами сокращения выбросов парниковых газов (Постановление Правительства РФ «О мерах по реализации статьи 6 Киотского протокола к Рамочной конвенции ООН об изменении климата» от 15 сентября 2011 г. № 780) [36].

Перейдем к характеристике стратегий по адаптации. Стратегии по адаптации должны включать в себя научные оценки рисков, уязвимости и потенциальных выгод предполагаемых климатических изменений с учетом природно-географических, экономических, социальных и иных особенностей конкретного региона или отрасли экономики. Кроме того, важная задача - проведение экономических оценок затрат и выгод предлагаемых адаптационных мер для обеспечения их максимального эффекта на единицу вложенных средств и разработки оптимальной стратегии по адаптации к изменению климата для принятия хозяйственных решений.

Основные подходы в подготовке адаптационных мер приводятся в руководстве МГЭИК по проведению оценок воздействия изменения климата и адаптации (1994 г.). Согласно Руководству, проведение таких оценок следует делать в несколько этапов:

- определение проблемы, вызванной или сопряженной с климатическими изменениями;
- выбор сценария (проекции изменения климата);
- оценка биофизических и социально-экономических последствий;

- оценка адаптационной стратегии.

Сложившийся подход к реализации адаптационных мер можно условно разделить на два основных:

- региональный (территории, районы, государство в целом, межгосударственный региональный подход, например, Евросоюз);
- секторальный (на уровне секторов экономики: сельское хозяйство, инфраструктура, здравоохранение и т.д., или целевой группы: коренное население, пожилые люди) [13].

В 2007 г. секретариатом РКИК ООН был проведен анализ существующих технологий в области адаптации к изменениям климата. Среди наиболее часто упоминавшихся Сторонами технологий около 1/3 относится к сельскому хозяйству и рыболовству, около 1/4 к управлению водными ресурсами и около 1/5 представляют собой технологии многопрофильного применения. Довольно много технологий было предложено для прибрежных зон (6%), поддержания биоразнообразия (5%), здравоохранения (4%) и инфраструктуры (4%).

В 2004 г. Программа развития ООН (ПРООН) и Глобальный экологический фонд (ГЭФ) при поддержке правительств Швейцарии, Канады и Нидерландов опубликовали руководство «Законодательная база в области адаптации» (Adaptation Policy Framework). В руководстве ПРООН-ГЭФ содержатся материалы по оценке климатических рисков и рекомендации по разработке и реализации адаптационных стратегий, и программ.

Перечисленные результаты деятельности в рамках РКИК ООН ведутся в рамках Найробийской программы работы в области воздействий изменения климата, уязвимости и адаптации, принятой в 2006 г.

Адаптация также является одним из «блоков» Балийского плана действий – решения 13-й сессии Конференции Сторон РКИК ООН по укреплению долгосрочного международного сотрудничества в области климата, которое стало основой для нового международного климатического соглашения на «посткиотский» период (передача технологий, финансирование адаптационных проектов, обмен опытом, проведение совместных научно-исследовательских работ, реализации региональных адаптационных мероприятий) [37].

Следующий шаг, недавнее Парижское соглашение РКИК ООН, регулирующее меры по снижению углекислого газа в атмосфере с 2020 г., сместило фокус глобальной климатической политики на адаптацию через расширение нормативных рамок вокруг адаптации, призыв к более жестким обязательствам в области адаптации со стороны государств, четко оговоренный многоуровневый характер управления адаптацией и призыв к организации более прозрачных механизмов для оценки прогресса в области адаптации к проявлениям современного изменения климата. Данное соглашение является важной вехой в текущих усилиях по обеспечению равного приоритета адаптации с политикой смягчения последствий изменения климата. Однако

предстоит проделать значительную работу, чтобы уточнить, как будет реализована значительная долгосрочная цель адаптации, изложенная в статье 7. Задача, стоящая перед Сторонами в осуществлении Парижского соглашения, заключается в том, чтобы установить надежные обязательства со стороны государственных и негосударственных субъектов в отношении планирования, осуществления и финансирования адаптации [38; 39; 40; 41].

Для многих развитых стран мира стратегия адаптации к изменению климата является официально утвержденным на национальном уровне документом с перечнем и распределением во времени конкретных мер и необходимых ресурсов [42]. Разработка такого документа в нашей стране является неизмеримо более сложной задачей, чем во многих странах, в силу размеров страны, включающих все климатические зоны с разными вероятными сценариями изменения климата, разнообразия и неоднородности географических, социально-экономических и демографических условий в различных регионах страны.

Отношение к проблеме на государственном уровне стало меняться в последние годы, инспирированное Киотским процессом, а также результатами инструментальных измерений, которые показывают, что скорость роста средней температуры в России более чем в два раза превышает скорость глобального потепления. То же самое касается частоты и интенсивности опасных погодных явлений, которые очень заметно растут на территории страны. Наиболее существенное изменение климата инструментально наблюдается в арктических и субарктических зонах вечной мерзлоты, которые составляет почти 67% территории страны [17].

Разработкой национальной климатической политики, включающей также и адаптацию, в нашей стране занимается Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Министерства природных ресурсов и экологии (Росгидромет). В 2005 г. Росгидромет опубликовал «Стратегический прогноз изменений климата РФ на период до 2010–2015 гг. и их влияния на отрасли экономики России» [43]. В документе рассматривалось изменение климата в различных регионах страны и были даны рекомендации по первоочередным мерам адаптации для различных отраслей экономики на региональном уровне. Этот документ можно рассматривать как первое официальное государственное изложение подходов к политике в области адаптации к современным изменениям климата.

В 2008 г. Росгидромет выпустил первый Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории РФ (российский аналог оценочных докладов МГЭИК ООН) [44]. Второй том доклада был целиком посвящен мерам по адаптации. Это был первый официальный документ, изданный Правительством, нацеленный на адаптацию к изменениям климата.

Несмотря на то, что в нашей стране не существует отдельного национального плана адаптации к изменениям климата, как это принято во многих странах, некоторые меры адаптации, направленные на снижение ущерба от опасных природных явлений и других опасных

климатических явлений были официально утверждены, основываясь, главным образом, на положениях Климатической доктрины. Доклад 2014 г. о ходе выполнения Комплексного плана реализации Климатической доктрины приводит ряд мер для предотвращения частоты лесных и торфяных пожаров, смягчения рисков для урожайности в сельском хозяйстве, ограничения неблагоприятных последствий, вызванных более частыми ливневыми паводками, подъемом уровня моря, смягчения последствий от сокращения площади горных ледников, возникновения опасных оползней и схода снежных лавин [43; 45]. Также Министерство природных ресурсов вступило в финальную фазу подготовки стратегического соглашения по сохранению биоразнообразия, которое включает задачи по адаптации биоразнообразия и лесного хозяйства к изменениям климата.

Последствия наблюдаемого быстрого изменения климата, проявляющиеся в увеличении количества и интенсивности опасных погодных явлений (наводнения и паводки, селявые потоки и снежные лавины, ураганы и шквалистый ветер и др.), наносят огромный социально-экономический ущерб, оказывают прямое воздействие на жизненно важные отрасли экономики страны [17; 46].

Информация о мерах адаптации к изменениям климата в ключевых отраслях экономики России [47; 48] сведена в Таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Основные меры адаптации к современным изменениям климата для ключевых отраслей экономики России

Ключевая отрасль экономики	Примеры/комментарии/меры по адаптации
Сельское хозяйство и продовольственная безопасность	а) дальнейшее развитие сельского хозяйства в нечернозёмной зоне РФ (Центральный и Северо-Западные Федеральные округа); б) оптимизация распределения посевных площадей для зимних и весенних культур; в) расширение посевных площадей теплолюбивых (кукуруза, подсолнечник, сорго, соя и т.д.) и пожнивных культур; г) дальнейшее развитие орошаемого земледелия и реализации федеральной целевой программы «Развитие орошения на сельскохозяйственных землях РФ в период 2014–2020»; д) расширение зоны субтропического хозяйства в южной части страны и ускорения развития таких отраслей, как садоводство и виноградарство, выращивание хлопка и риса, эффективность которых может значительно увеличиться при потеплении; е) повышение эффективности животноводства в результате роста биоклиматического потенциала и сокращения периода удержания скота при ожидаемых потепления климата; ж) использования более термостойких культур и сортов, а также создание резервных запасов продовольствия с целью снижения возможных потерь от засушливого климата и обеспечения продовольственной безопасности.

Продолжение Таблицы 1.1

Прибрежные зоны	Для защиты прибрежных зон от ожидаемого повышения уровня моря, в зонах постоянного затопления предложено строительство бетонных защитных гидротехнических сооружений; защитных дамб из песка и галечных смесей; защита побережья от эрозии; эвакуация имущества и перенос/снос береговой инфраструктуры и населенных пунктов.
Лесное хозяйство	Реализация комплексной программы по охране лесов, обеспечение повышения пожарной безопасности в лесах и совершенствование дистанционного оперативного мониторинга лесов.
Строительство и инфраструктура	Принят новый технический регламент о безопасности зданий и сооружений, который требует, чтобы в технической проектной документации дополнительно должны быть указаны параметры, характеризующие устойчивость к неблагоприятным воздействиям климатических и других агрессивных факторов окружающей среды и/или мер по защите зданий, сооружений и инфраструктуры от таких воздействий. Министерство регионального развития России проводит научное обоснование и разработку мер, направленных на минимизацию рисков снижения надежности и долговечности зданий, сооружений, транспортных систем и инфраструктуры, расположенных в зоне вечной мерзлоты. Были обновлены строительные стандарты тепловой защиты зданий (СНиП 23-02-2003) в соответствии с современными требованиями энергоэффективности.
Здравоохранение	Разработка планов адаптации для населения городских районов, которые в большей степени подвержены воздействиям волн жары. Принятие планов по укреплению эпидемиологического надзора за чувствительными к климату инфекционными заболеваниями и внедрение соответствующих мер профилактики.

Таким образом, основным современным трендом политики в области адаптации к климатическим изменениям в нашей стране является переход от оценки уязвимости и адаптационного потенциала к формулированию мер по адаптации. Уровень практической реализации адаптационных мер низкий. Для этого имеются серьезные причины, среди которых можно выделить следующие:

- неясен источник финансирования мер по адаптации, нормативные акты не определяют источники средств для поддержки адаптации к изменениям климата;
- отсутствие единой национальной стратегии адаптации к изменениям климата, климатические риски до некоторой степени рассматриваются в различных отраслевых и региональных программах развития, однако до сих пор нет комплексного документа, ясно определяющего перечень действий на федеральном, региональном и муниципальном уровнях;
- отсутствие государственного органа, который бы следил за реализацией мер адаптации и оценивал их эффективность (Росгидромет публикует отчеты о ходе выполнения

Комплексного плана реализации Климатической доктрины РФ, но эти отчеты носят скорее декларативный характер);

- отсутствие количественных оценок стоимости мер по адаптации;
- малое количество пилотных исследований по реализации мер по адаптации на региональном или местном уровне. Лишь несколько регионов занялись разработкой региональных климатических стратегий (Мурманская область, 2009; Санкт-Петербург, 2013; Архангельская область, 2014).

Только при условии преодоления указанных недостатков может появиться возможность перехода от стадии исследований и планирования к стадии эффективной реализации мер по адаптации. На этом пути представляется необходимым разработка и включение в стратегии развития регионов разделов с региональными климатическими программами, завершающихся перечнем мер по адаптации региональной экономики к ожидаемым изменениям климата [49].

Что же касается Якутии, то Правительством республики предлагается выполнение следующих задач для подготовки адаптационных мер к проявлениям изменения климата:

- проведение фундаментальных исследований по выявлению основных климатообразующих факторов для разработки реальных сценариев изменения климата республики;
- организация комплексного геокриологического мониторинга для оценки реакции вечной мерзлоты на колебания климата в разных природно-ландшафтных условиях;
- разработка новых типов фундаментов зданий и сооружений, которые надежно могли бы функционировать при изменении температурных условий и других параметров мерзлых грунтов;
- организация мониторинговых биоэкологических исследований для оценки степени изменения биоразнообразия при колебаниях климата;
- выявление закономерностей изменения водного баланса северных территорий и при потеплении климата;
- исследование последствий влияния изменений климата на здоровье и благосостояние коренных малочисленных народов Севера Якутии.

1.5 Методика исследований для формирования региональной климатической программы

Данная диссертационная работа посвящена разработке региональной климатической программы на примере самого крупного региона России – Республики Саха (Якутия). Эта программа должна включать в себя три стадии исследований, соответствующих деятельности трех рабочих групп МГЭИК, а именно:

- дать оценку современных региональных изменений климата и возможные его проекции на будущее;
- оценить уязвимость климатических индикаторов, связанных с различными отраслями экономики к климатическим изменениям в настоящем и будущем;
- дать рекомендации по адаптации и смягчению последствий регионального изменения климата.

Для реализации первой стадии исследований следует выполнить следующие виды работ:

- сформировать региональную базу данных рядов климатических характеристик, включающих такие основные показатели как температура воздуха и осадки;
- осуществить оценку качества сформированной базы данных, включая анализ однородности данных, восстановление пропусков наблюдений и приведение рядов наблюдений к продолжительному периоду и в результате создать качественную базу данных для выполнения климатического моделирования;
- выполнить статистическое моделирование временных рядов, по результатам которого установить для каких климатических характеристик, когда и в каких районах республики наблюдаются проявления современных изменений климата;
- выбрать наиболее эффективную физико-математическую климатическую модель для территории Якутии на основе которой необходимо представить сценарные оценки будущих изменений климатических норм до конца 21 века.

В качестве базовых климатических характеристик будут рассмотрены среднемесячные значения температур воздуха и сумм месячных осадков практически на всех метеостанциях республики Якутия (96 из 101) за период с начала наблюдений по 2014 г. (для некоторых оценок по 2016 г. включительно). Полученные для них результаты будут основой оценки современного и будущего климата республики. По предлагаемой технологии в дальнейшем могут быть получены оценки климатических изменений и для других климатических характеристик, таких как: экстремальные температуры и осадки, влажность воздуха, давление, различные метеорологические явления (грозы, снегопады, туманы) и другие.

При реализации второй стадии исследования – уязвимости климатических индикаторов, будут рассмотрены три группы климатических индикаторов, имеющих первоочередное значение для ведущих отраслей экономики республики. Это:

- температура почвы на различных глубинах, которая связана с температурой воздуха и влияет на оттаивание вечной мерзлоты, что важно в различных отраслях строительства, горнодобывающей промышленности, сельском хозяйстве;
- число лесных пожаров, которое может увеличиваться за счет увеличения температуры и уменьшения осадков в пожароопасный период и влияет как на лесное хозяйство республики, так и является опасным явлением;

- максимальные расходы и уровни воды весеннего половодья, которые могут увеличиваться за счет повышения температуры в период половодья и сумм твердых осадков и напрямую влияют на динамику вырабатываемых гидроэнергетических ресурсов, связаны с затоплением территории и влиянием на речные экосистемы.

Для каждого из выбранных климатических индикаторов будет проведено исследование, включающее оценку современных изменений этого индикатора, установление его взаимосвязей с базовыми климатическими факторами и оценку проекций будущих изменений индикатора при сценарных изменениях климатических показателей. По аналогичной методической схеме, которая будет включена в Региональную климатическую программу, может быть выполнено исследование и других климатических индикаторов.

Третья стадия исследований будет направлена на разработку перечня мероприятий для адаптации и снижения последствий возможного негативного изменения климатических индикаторов, а также оценку возможного ущерба от негативных последствий изменения климатических индикаторов, если адаптационные меры не проводить.

В завершении всех стадий исследования будет сформирована основа Региональной климатической программы для Республики Саха (Якутия), включающая в себя как перечень методик, необходимых мероприятий, так и конкретные примеры реализации предлагаемых методик.

2. Оценка современных изменений климата на территории

Республики Саха (Якутия)

2.1 Формирование и анализ качества региональной базы данных

В качестве исходной информации для формирования региональной базы данных климатической информации по Республике Саха (Якутия) были выбраны многолетние ряды температур воздуха и осадков месячной дискретности (среднемесячные данные) за период с начала метеорологических наблюдений в регионе, который начинается с конца XIX в. до 2014 г. включительно. Архивы многолетних рядов температур воздуха и осадков были собраны в Якутском управлении по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Для анализа были отобраны данные 96 наиболее длиннорядных метеостанций (из 101), находящихся на территории Якутии, которые имеют наиболее полный непрерывный период наблюдений и функционируют до настоящего времени. Распределение метеостанций по продолжительности рядов наблюдений показано на Рисунке 2.1, из которого следует, что подавляющее число метеостанций имеет период наблюдений 50 лет и более, а 6 из них – продолжительность наблюдений 100 лет и более, что дает возможность использовать их в качестве аналогов для приведения большинства остальных рядов к непрерывному, многолетнему и одинаковому периоду.

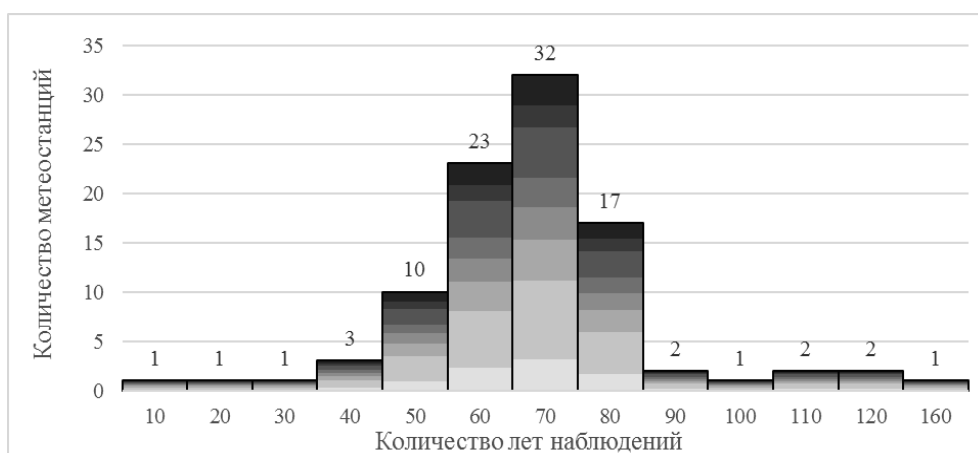


Рисунок 2.1 – Распределение метеостанций Республики Саха (Якутия) по продолжительности проводимых метеонаблюдений за температурой воздуха

Региональные базы данных по температуре воздуха и атмосферным осадкам (БД) были сформированы с помощью СУБД-программного комплекса (ПК) «Гидрорасчеты» [сертификат Госстандарта РФ № 0812948, РОСС RU.СП04.Н00118 и Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ № 2010615886].

Сформированные геоинформационные слои координат метеостанций региональных БД по температуре воздуха и атмосферным осадкам приведены на Рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Расположение метеостанций региональных БД температуры воздуха и атмосферных осадков по территории Якутии

Из Рисунка 2.2 следует, что количество метеостанций достаточно для надежных пространственных обобщений, и они довольно равномерно размещены по территории республики.

В виду того, что дальнейший анализ и моделирование температуры воздуха и атмосферных осадков были осуществлены отдельно, для выбранных метеостанций были сформированы две отдельные региональные климатические базы данных:

- база данных, содержащая многолетние ряды среднемесячных температур воздуха по 96 станциям;
- база данных, содержащая многолетние ряды сумм месячных осадков по 96 станциям.

Так, средний период наблюдений за температурой воздуха в республике составляет 73 года, а наибольший – 168 лет на старейшей метеостанции Якутии – г. Якутск. Наибольшая продолжительность наблюдений также имеет место на метеостанциях: Верхоянск (126 лет), Среднеколымск (125 лет), Вилуйск (119 лет), Олекминск (118 лет) и Усть-Мая (107 лет).

Подробная информация по метеостанциям представлена в Таблице 2.1, которая включает в себя основные показатели станций, такие как пятизначный код ВМО, название, координаты, а также информационные характеристики исходных данных в виде периода наблюдений.

Таблица 2.1 – Пункты многолетних наблюдений за температурой воздуха и атмосферными осадками на территории Республики Саха (Якутия) и их характеристики: координаты, период и продолжительность наблюдений (n, годы)

№	Код ВМО	Наименование станции	Широта, град	Долгота, град	Период наблюдений за температурой воздуха	Период наблюдений за атмосферными осадками
1	21432	Котельный остров	137,90	76,00	1933–2013	1933–2013
2	21535	Санникова пролив	64	126	1940–2013	1942–2013
3	21608	Анабар	73	114	1988–2013	1988–2013
4	21636	Кигилях Мыс	139,88	73,35	1934–2013	1934–2013
5	21802	Саскылах	114,09	71,96	1935–2013	1936–2013
6	21813	Тюмеги	123,55	71,90	1948–2013	1948–2013
7	21824	Тикси	128,87	71,64	1932–2013	1932–2013
8	21908	Джалинда	70,13	113,97	1942–2013	1942–2013
9	21921	Кюсюр	127,36	70,68	1909–2013	1888–2013
10	21931	Юбилейная	70,77	136,22	1820–2013	1895–2013
11	21946	Чокурдах	147,90	70,62	1939–2013	1939–2013
12	24076	Депутатский	139,96	69,30	1960–2013	1952–2013
13	24111	Екочю	131,62	66,76	1944–2013	1944–2013
14	24125	Оленек	112,45	68,51	1936–2013	1937–2013
15	24136	Сухана	118,03	68,72	1938–2013	1938–2013
16	24143	Джарджан	124,03	68,74	1936–2013	1936–2013
17	24194	Белая Гора	146,19	68,54	1997–2013	1998–2013
18	24219	Ярольин	108,60	67,10	1957–2013	1957–2013
19	24222	Комака	60,13	111,58	1944–2013	1944–2013
20	24261	Батагай-Алыта	130,40	67,80	1946–2013	1946–2013
21	24263	Батагай	134,64	67,65	1949–2013	1949–2013
22	24266	Верхоянск	133,39	67,55	1869–2013	1886–2013
23	24322	Полярный	112,12	66,41	1973–2013	1970–2013
24	24329	Шелагонцы	66,25	114,29	1940–2013	1940–2013
25	24333	Куйга	135,56	70,00	1971–2013	1971–2013
26	24338	Эйк	66,03	117,40	1940–2013	1940–2013
27	24343	Жиганск	123,37	66,77	1935–2013	1935–2013
28	24371	Усть-Чаркы	136,68	66,79	1942–2013	1942–2013
29	24382	Усть-Мома	66,46	143,22	1937–2013	1937–2013
30	24449	Бестяхская Звероферма	65,28	124,12	1949–2013	1948–2013
31	24477	Иэма	65,30	135,81	1944–2013	1944–2013
32	24525	Хабардино	65	113	1972–2013	1972–2013
33	24538	Чумпурук	64,23	16,92	1955–2013	1956–2013

Продолжение Таблицы 2.1

34	24557	Сога-Хая	64	126	1940–2013	1940–2013
35	24585	Нера	143,24	64,57	1937–2013	1938–2013
36	24588	Юрты	64,25	142,08	1956–2013	1956–2013
37	24639	Нюрба	118,35	63,29	1933–2013	1933–2013
38	24641	Виллойск	121,63	63,75	1863–2013	1898–2013
39	24643	Хатырык-Хомо	124,82	63,95	1957–2013	1952–2013
40	24644	Верхневиллойск	120,31	63,45	1950–2013	1937–2013
41	24652	Сангар	127,48	63,92	1930–2013	1930–2013
42	24656	Батамай	129,42	63,53	1940–2013	1940–2013
43	24661	Сеген-Кюель	130,31	64,00	1938–2013	1938–2013
44	24668	Верхоянский Перевоз	63	132	1948–2013	1942–2013
45	24671	Томпо	135,85	63,91	1933–2013	1933–2013
46	24679	Восточная	63,22	139,60	1942–2013	1942–2013
47	24684	Агаякан	141,73	63,34	1953–2013	1953–2013
48	24688	Оймякон	142,79	63,46	1930–2013	1943–2013
49	24691	Делянكير	145,60	63,84	1945–2013	1945–2013
50	24724	Чернышевский	112,47	63,02	1964–2013	1963–2013
51	24725	Туой-Хая	111,24	62,53	1935–2013	1935–2013
52	24726	Мирный	113,98	62,54	1959–2013	1959–2013
53	24737	Крестях	116,17	62,25	1950–2013	1950–2013
54	24738	Сунтар	117,65	62,16	1900–2013	1899–2013
55	24739	Чаингда	119,74	62,26	1944–2013	1944–2013
56	24753	Намцы	129,66	62,72	1932–2013	1935–2013
57	24758	Бердигестях	126,70	62,10	1943–2013	1943–2013
58	24763	Крест-Хальджай	134,51	62,82	1933–2013	1933–2013
59	24768	Чурапча	132,43	62,00	1911–2013	1894–2013
60	24771	Теплый Ключ	136,81	62,78	1943–2013	1943–2013
61	24826	Дорожный	114,36	61,45	1944–2013	1944–2013
62	24843	Тонгулах	124,52	61,96	1948–2013	1948–2013
63	24856	Покровск	129,14	61,48	1931–2013	1931–2013
64	24871	Охотский Перевоз	135,53	61,88	1938–2013	1938–2013
65	24923	Ленск	114,92	60,71	1940–2013	1940–2013
66	24933	Килеер	119,29	61,02	1949–2013	1949–2013
67	24944	Олекминск	120,44	60,37	1882–2013	1882–2013
68	24951	Исить	125,32	60,81	1932–2013	1932–2013
69	24959	Якутск	129,73	62,03	1830–2013	1888–2013
70	24962	Амга	131,97	60,90	1932–2013	1894–2013
71	24966	Усть-Мая	134,54	60,42	1893–2013	1896–2013
72	24967	Тегюльтя	130,19	60,16	1942–2013	1942–2013
73	24975	Ыныкчан	137,70	60,27	1964–2013	1965–2013
74	25017	Андрюшкино	154,45	69,17	1982–2013	1976–2013
75	25121	Колымская	158,71	68,73	1949–2013	1949–2013
76	25123	Черский	161,33	68,75	1940–2013	1940–2013
77	25206	Среднеколымск	153,71	67,46	1887–2013	1886–2013
78	25400	Зырянка	150,89	65,73	1935–2013	1935–2013
79	30054	Витим	112,57	59,44	1929–2013	1886–2013
80	30074	Мача	117,58	59,91	1949–2013	1949–2013
81	30089	Джикимда	59,02	121,77	1939–2013	1939–2013
82	30173	Тяня	119,80	59,06	1942–2013	1942–2013
83	30198	Суон-Тит	143,25	66,44	1959–2013	1951–2013
84	30393	Чульман	124,90	56,84	1927–2013	1926–2013
85	30493	Нагорный	124,92	55,95	1926–2013	1925–2013
86	31004	Алдан	125,39	58,61	1926–2013	1926–2013
87	31005	Томмот	126,27	58,97	1929–2013	1926–2013
88	31011	Буяга	59,65	127,11	1942–2013	1942–2013
89	31016	Угино	128,53	58,67	1948–2013	1948–2013
90	31026	Учур	58,73	130,62	1934–2013	1934–2013
91	31041	Усть-Миль	133,12	59,64	1946–2013	1943–2013
92	31054	Усть-Юдома	135,16	59,16	1948–2013	1948–2013
93	31062	Югоренок	137,69	59,75	1946–2013	1946–2013
94	31102	Канку	126,02	57,62	1950–2013	1950–2013
95	31123	Чюльбю	131,04	57,83	1949–2013	1949–2013
96	31137	Токо	59,98	119,83	1945–2013	1945–2013

Информация о распределении продолжительности рядов наблюдений за атмосферными осадками на территории Якутии приведена в Таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Распределение метеостанций Республики Саха (Якутия) по продолжительности проводимых метеонаблюдений за атмосферными осадками

Количество лет наблюдений	Количество метеостанций
10	1
20	1
30	1
40	4
50	6
60	27
70	34
80	14
90	1
100	2
110	3
120	2

Оказалось, что средний период наблюдений за атмосферными осадками в республике составляет 72 года. В свою очередь наибольший период наблюдений составил 126 лет и имеет место опять же на старейшей метеостанции республики – метеостанции г. Якутск. Также наибольшая продолжительность наблюдений за атмосферными осадками отмечается на метеостанциях: Верхоянск (122 года), Среднеколымск (113 лет), Вилюйск (116 лет), Олекминск (119 лет), Усть-Мая (109 лет) и Кюсюр (100 лет).

В результате проведенной работы с применением СУБД ПК «Гидрорасчеты» была сформирована региональная база данных климатических показателей температуры воздуха и атмосферных осадков, включающая практически все имеющиеся в наличии наблюдения.

Следующей важной задачей, которая была решена до проведения статистического моделирования, была оценка качества и однородности исходной климатической информации и формирование многолетних рядов одинаковой продолжительности с отсутствием пропусков наблюдений. Для оценки однородности данных были применены статистические критерии Диксона и Смирнова-Граббса [50; 51], позволяющие выявлять резко отклоняющиеся от общего эмпирического распределения экстремумы, которые могут быть обусловлены как погрешностями наблюдений или расчета эмпирической повторяемости редких событий, так и другим генезисом формирующих факторов.

Для оценки однородности чрезвычайных экстремумов в эмпирических распределениях среднемесячных температур воздуха и атмосферных осадков были выбраны ряды наблюдений продолжительностью 30 лет и более (в итоге были отсеяны только две станции – Анабар и Белая

Гора), что позволяет исключить события, являющиеся неоднородными за счет короткого ряда наблюдений. Результаты оценки однородности экстремумов по критериям Диксона и Смирнова-Граббса даны в Таблице 2.3 – для температуры воздуха и соответственно Таблице 2.4 – для атмосферных осадков, при этом надо отметить, что данные таблицы подготовлены после исключения и устранения ошибок подготовки данных. В таблицах приведены только случаи гарантированных отклонений гипотезы однородности при уровне значимости $\alpha_p < 1\%$, рядом приводится год, в который имел место неоднородный экстремум. Для остальных случаев приводится уровень значимости, соответствующий расчетному значению статистики α_p . Под словами «Макс.» понимаются результаты проверки по всем 6 критериям (5 критериев Диксона и 1 критерий Смирнова-Граббса) для максимального отклоняющего экстремума.

Таблица 2.3 – Установленные неоднородности в рядах среднемесячных температур на метеостанциях Республики Саха (Якутия)

№	Название станции	Месяц	Экстремум	Год	&	Вид экстремума
1	Кигилях	Май	Мах	1990	0,9–2,5	РЕДКОЕ СОБЫТИЕ
2	Джалинда	Февраль	Мах	1964	0,9–1,8	РЕДКОЕ СОБЫТИЕ
3	Депутатский	Март	Мах	1990	2,0	РЕДКОЕ СОБЫТИЕ
4	Батагай-Алыта	Март	Мах	1990	2,9	РЕДКОЕ СОБЫТИЕ
5	Чумпурук	Март	Мах	1990	2,3	РЕДКОЕ СОБЫТИЕ
6	Верхоянский Перевоз	Март	Мах	1989	0,9	РЕДКОЕ СОБЫТИЕ
7	Крест-Хальджай	Февраль	Мах	1995	0,9–2,7	РЕДКОЕ СОБЫТИЕ
8	Чурапча	Сентябрь	Мах	1983	1,4–2,5	РЕДКОЕ СОБЫТИЕ
9	Исить	Январь	Мах	2007	0,9	РЕДКОЕ СОБЫТИЕ
10	Угино	Январь	Мах	2007	0,9–2,6	РЕДКОЕ СОБЫТИЕ
11	Хабардино	Март	Мах	1990	1,3–1,7	РЕДКОЕ СОБЫТИЕ

Из результатов Таблицы 2.3 следует, что число неоднородных экстремумов для среднемесячных температур воздуха не столь велико. Если считать, что общее число тестов по двум критериям (Диксона и Смирнова-Граббса) для 96 станций и 12 месяцев равно 2304, то общее число выводов о неоднородности 29, включая случаи отклонения гипотезы однородности, представленные в Таблице 2.3 – или всего 1,3%.

В свою очередь Таблица 2.4 свидетельствует о выявлении семи случаев неоднородности для месячных сумм атмосферных осадков, что является и вовсе практически незначительным.

Таблица 2.4 – Установленные неоднородности в рядах среднемесячных осадков на метеостанциях Республики Саха (Якутия)

№	Код	Название метеостанции	Мах	№	Код	Название метеостанции	Мах
Январь				Март			
1	31016	Угино	(-) 0,9–2,4	2	21802	Саскылах	(-) 1,8–2,8
№	Код	Название метеостанции	Мах	№	Код	Название метеостанции	Мах
Июнь				Август			
3	24975	Ыныкчан	(-) 2,6–2,7	5	24477	Иэма	(-) 0,9–2,2
4	30089	Джикимда	(-) 1,1–2,4				
№	Код	Название метеостанции	Мах	№	Код	Название метеостанции	Мах
Октябрь				Ноябрь			
6	21432	Котельный остров	(-) 1,0–1,4	7	25206	Среднеколымск	2,9–4,9

Проведенный анализ многолетних рядов температуры воздуха и атмосферных осадков, содержащих неоднородные экстремумы, показал, что причины неоднородности заключаются в основном в том, что в рядах имеются пропуски наблюдений и они недостаточно продолжительны, что и усилило статистическую значимость экстремумов. На Рисунке 2.3 показан пример установленного неоднородного максимума для температуры воздуха.



Рисунок 2.3 – Пример неоднородного экстремума в рядах среднемесячных температур воздуха (экстремум указан стрелкой)

Как правило, резко отклоняющиеся экстремумы не характерны для температур воздуха при месячном интервале осреднения. Поэтому, для выявленных неоднородных данных была

проведена тщательная проверка их качества. В результате проверки было установлено следующее: на метеостанции Исить максимум января 2007 г. обуславливается нехарактерной аномально высокой температурой января в $-21,5^{\circ}\text{C}$, отличающейся от многолетней средней – $35,4^{\circ}\text{C}$ практически на 10°C .

Выявленные неоднородные экстремумы не были исключены из рядов наблюдений для последующей процедуры восстановления пропусков и удлинения рядов, так как это были фактические наблюдения и возможно в удлиненном ряду экстремум не будет восприниматься как неоднородный. Но вместе с тем полученные результаты оценки неоднородности учитывались при последующей оценке стационарности.

Результаты оценки стационарности на тех же 96 станциях по критериям Фишера (Ф) и Стьюдента (Ст) приведены в Таблицах 2.5 и 2.6 (температура воздуха), и в Таблицах 2.7 и 2.8 (атмосферные осадки) отдельно за холодный и теплый периоды года для выявленных случаев нестационарности, где отмечены месяцы, в которых была выявлена нестационарность.

Таблица 2.5 – Установленные нестационарности в рядах среднемесячных температур на метеостанциях, расположенных на территории Республики Саха (Якутия), за теплый период года

Станция	Номера месяцев с нестационарностью		Станция	Номера месяцев с нестационарностью	
	Ст	Ф		Ст	Ф
Алдан	5		Оленек		5
Амга	5,6		Охотский Перевоз	5,6	
Батагай	5,7		Покровск	5,6	
Батагай-Алыта	5,7,8		Сангар	5	
Батамай	5		Сеген-Кюель	5	
Бердигестях	5,6,7		Среднеколымск	5	
Бестяхская Звероферма	5		Сунтар	5	
Буяга	5,6	9	Суон-Тит	6	
Верхневиллюйск	5		Тегюльтя	5,6	
Верхоянск	5		Теплый Ключ	5	
Верхоянский Перевоз	5		Токо	5,6	
Виллюйск	5,6		Томмот	5	
Депутатский	7		Томпо	5,6	
Джикимда	5		Тонгулах	5,6,7	
Дорожный	8		Туой-Хая	6,8,9	
Екючю	5		Тюмети	8	
Жиганск		9	Тяня		8
Зырянка		6	Угино	6	
Иэма	6		Усть-Мая	8,9	5,9
Канку	5,6		Усть-Миль	5,6,7	
Килеер	5		Усть-Юдома	5,6	
Крест-Хальджай	5,6		Учур	5,6	
Крестях	5		Хабардино	6,7	
Кюсюр		9	Чаингда	5	

Продолжение Таблицы 2.5

Ленск	5		Чернышевский	5	
Мача	5		Чульман	5,6	6
Нагорный	5,6	8	Чурапча	5,6	
Намцы	6		Чюльбю	5,6	
Нера	5		Ыныкчан	6	
Нюрба	5		Югоренок	5,6	
Оймякон	5,6	6	Юрты	6	
Олекминск	5,9		Якутск	5,6	

Таблица 2.6 – Установленные нестационарности в рядах среднемесячных температур на метеостанциях, расположенных на территории Республики Саха (Якутия), за холодный период года

Станция	Номера месяцев с нестационарностью		Станция	Номера месяцев с нестационарностью	
	Ст	Ф		Ст	Ф
Агаякан	11	1	Оленек	1,2,4,11	4,12
Алдан	4		Охотский Перевоз	1,4	
Амга	1,4		Покровск	1,4	
Андрюшкино	3,10		Сангар	4	
Батагай	4,11		Сеген-Кюель	4	
Батагай-Алыта		10	Сого-Хая	4	
Батамай	4		Среднеколымск	1	
Белая Гора	10	10	Сунтар	3,4	
Бердигестях	1,2,12		Суон-Тит	2,3,4	4
Бестяхская Звероферма	4	2	Сухана	4	
Буюга	2,4,12		Тегюльтя	4,12	
Верхневилуйск	2,4		Теплый Ключ	4	
Верхоянск	1,12		Токо	1,2,4	3,4
Верхоянский Перевоз	4		Томмот	4	
Восточная	4		Томпо	1,4	
Делянكير	10,11		Тонгулах	2,4	4
Депутатский		1	Туой-Хая	10,11,12	
Джикимда	2		Угино	2,3,4	4
Дорожный	2,3,12		Усть-Мая	1,3,4,10,12	
Екючю	1		Усть-Миль	1,2	
Зырянка		2	Усть-Мома	1,2,4,11,12	
Иэма	4		Усть-Юдома	2,4	
Канку	4	4	Учур	4	
Кигилях Мыс		2	Чаингда	2,4	
Килеер	2,4		Чернышевский	2	
Колымская	10,11	2	Черский	10	1
Крест-Хальджай	1,4		Чокурдах		1
Куйга	11		Чульман	1,2,3,4,11,12	4
Ленск	2		Чумпурук	4	
Мача	4		Чурапча	1,3,4,12	
Нагорный	4		Чюльбю	2,4	4
Намцы	1,4,11,12		Юбилейная	1	
Нера	3,4		Югоренок	4	12
Нюрба	4		Юрты		1
Оймякон	1,4		Якутск	1,4,12	
Олекминск	3	4			

Согласно Таблицам 2.5 и 2.6 число нестационарных рядов составляет – 248 (21,5%), из них 145 – в холодный (12,6%), и 103 – в теплый период года (8,9%). По месяцам года их число варьирует от 1–3 случаев в теплый период года и в пределах 1–6 – в холодный, в целом нестационарность в рядах температуры встречается чаще в холодный период года.

Таблица 2.7 – Установленные нестационарности в рядах среднемесячных атмосферных осадков на метеостанциях, расположенных на территории Республики Саха (Якутия), за теплый период года

Станция	Номера месяцев с нестационарностью		Станция	Номера месяцев с нестационарностью	
	Ст	Ф		Ст	Ф
Агаякан		5	Мача		5
Амга	9		Нагорный		9
Анабар		7	Намцы	5,9	
Андрюшкино		7	Нера		7
Батагай		7	Нюрба	5,6	5,8
Батагай-Альта		5,6,7	Олекминск	5,9	
Батамай		6,8,9	Покровск	9	6
Белая Гора		5	Сангар		8
Бердигестях	9	8	Санникова пролив	9	5
Бестяхская Звероферма		9	Сеген-Кюель		7
Буяга		5,6	Среднеколымск	5	7,8,9
Верхневиллойск		5	Сунтар	6	8,9
Верхоянск	5	5	Суон-Тит		5
Верхоянский Перевоз		9	Теплый Ключ		5
Виллойск		6	Токо		9
Витим	5		Томмот	6	
Депутатский		6	Томпо		5,7
Джикимда		5,8	Тонгулах		9
Дорожный		5	Тюмети		6
Екючю	5	5	Тяня	9	5,8
Зырянка	9	9	Угино	6	
Иситель	9		Усть-Мая	5,8,9	5,8
Канку		9	Усть-Чаркы		8
Килеер	8	7	Хатырык-Хомо		9
Колымская		9	Чаингда		5
Комака		9	Черский	5,9	
Котельный остров	9		Чульман	9	
Крест-Хальджай		5	Шелагонцы		8
Куйга	9		Эйк	9	6
Кюсюр	5,6,7		Юбилейная	5	5,9
Ленск		5,7	Югоренок		5,9
			Юрты		7

Таблица 2.8 – Установленные нестационарности в рядах среднемесячных атмосферных осадков на метеостанциях, расположенных на территории Республики Саха (Якутия), за холодный период года

Станция	Номера месяцев с нестационарностью		Станция	Номера месяцев с нестационарностью	
	Ст	Ф		Ст	Ф
Алдан	2,3,10,11,12		Оленек	2,3,11	1
Анабар		1	Охотский Перевоз		2,3
Андрюшкино	2	2	Сангар	1,2,4,10,11, 12	1,2,3,11,12
Батагай		1	Санникова пролив	10	1,2,10,11,12
Батагай-Алыта		1,2,3	Саскылах	10,11	
Батамай	2	2	Сеген-Кюель		2
Бердигестях		2,11	Сого-Хая	2,11	2,11,12
Бестяхская Звероферма		2,10	Среднеколымск	2,4,10	2,3,10,11
Верхоянск		1	Сунгар	10	4,10
Верхоянский Перевоз		2,11	Суон-Тит		2,11
Вилуйск	10,11	10,11	Тегюльтя		1,11
Витим	1,2,3,10,11, 12	12	Тикси		10,11
Восточная		3	Токо		2
Делянкир		12	Томмот	2,3,12	
Депутатский		1	Томпо	2	2,4
Джалинда		2	Туой-Хая	3,10,11	1,3
Джарджан	12		Тюмети		10,12
Джикимда		4,11	Тяня	2	2
Дорожный	2,3,10,11,12	2,10	Угино	2	1,2,11
Екючю		3,12	Усть-Мая	1, 10,11,12	3
Жиганск	12		Усть-Миль		1
Зырянка		4	Усть-Мома		1,4
Исить	1,2,3,12	10,11	Усть-Чаркы		4
Иэма		1,3,4	Учур	12	
Канку	2	12	Хабардино		11
Кигилях Мыс		1,4,11,12	Хатырык-Хомо		2
Колымская	1,2	1,4,11	Чаингда	12	2,3
Комака	2,3,10	4,10	Чернышевский	2,10	10
Котельный остров	10	1	Черский	1,3	
Крест-Хальджай		2	Чокурдах		12
Куйга	11	11	Чульман	2,4,10,11,12	10
Кюсюр	1,2,3,10,11, 12	1,2,3,4,10,11, 12	Чумпурук		10,11
Ленск	10	10	Чурапча		2
Мача		11,12	Чюльбю		4
Мирный	3,10	10	Шелагонцы	2	1,10
Нагорный	2	1,2,4,10	Эйк	1,2,3,10,11, 12	3
Намцы		2,12	Юбилейная	2,3	2
Нера		1,2,3,11	Югоренок		4,11
Оймякон		12	Юрты		4
Олекминск	1,2,3,11,12		Якутск	11	1,2,11
			Ярольбин	2	1

Число нестационарных рядов атмосферных осадков составляет – 343 (29,8%), из них 241 (20,9%), – в холодный и 102 (8,9%), – в теплый период года. По месяцам года их число изменяется от 1–3 в теплый период года и варьирует в пределах 1–7 – в холодный. Нестационарность в рядах осадков, как и в рядах температуры, встречается чаще в холодный период года.

Основные выводы по нестационарности следующие:

- нестационарными по дисперсиям являются 34 ряда температур воздуха и 200 рядов осадков;
- в холодный период года нестационарность средних значений в рядах температуры наблюдается на большем числе станций (до 6 станций), чем в теплые месяцы (1–3 станции);
- в холодный период года нестационарность в рядах осадков наблюдается гораздо чаще, чем в теплый сезон;
- нестационарных рядов температуры по средним больше, чем по дисперсиям, они имеют место не только на станциях с неоднородными экстремумами или пропусками наблюдений, но и в целом характеризуют нестационарность климата, которая больше проявляется в холодные месяцы года;
- число нестационарных рядов осадков по средним и по дисперсиям практически одинаково, как и случае с температурой воздуха, они имеют место не только на станциях с неоднородными экстремумами или пропусками наблюдений, но вообще характеризуют нестационарность климата и смену регистрирующих приборов, что гораздо больше проявляется в холодный период года.

Нестационарные данные также были оставлены в рядах наблюдений для применения процедуры приведения к многолетнему периоду в связи с тем, что они являются фактическими наблюдениями.

Третий этап заключался в приведении рядов к многолетнему периоду и восстановлению пропусков наблюдений. В связи с тем, что имеет место высокая пространственная связанность одинаковых климатических характеристик по территории (большая для температуры воздуха и меньшая для осадков), это природное свойство можно использовать, чтобы привести ряды к одинаковому многолетнему периоду и восстановить пропуски наблюдений.

Для приведения к многолетнему периоду и восстановления пропусков наблюдений была применена методика, представленная и реализованная, например, в работах [52; 53; 54; 55]. Подобная процедура необходима для дальнейшего эффективного статистического моделирования временных рядов, которое должно отвечать трем основным условиям:

- ряды наблюдений должны иметь достаточную продолжительность, гарантирующую как надежность моделирования, так и возможность оценки устойчивости моделей за разные интервалы времени;

- в рядах должны отсутствовать пропуски наблюдений, и они должны включать последние годы наблюдений;
- сами ряды должны быть практически одинаковой длины для корректного пространственного обобщения результатов.

Восстановление пропусков наблюдений и приведение к многолетнему периоду также осуществлялось с применением комплекса «Гидрорасчеты». В среднем за счет данной процедуры удалось увеличить продолжительность рядов температуры почти в два раза: с 70 до 132 лет. При этом полученная средняя продолжительность восстановленных рядов варьирует от 122 лет (декабрь) до 141 года (май) и имеет некоторую зависимость от сезона года: весной и осенью восстановление идет несколько лучше, чем летом и зимой (Табл.2.9). В большинстве случаев из 96 рядов наблюдений для каждого месяца к многолетнему периоду удалось привести 93. Многолетние ряды наблюдений по станциям Якутск, Усть-Мая, Среднеколымск не были дополнены восстановленными данными, так как эти ряды имели наибольшую продолжительность наблюдений в 168, 107 и 125 лет соответственно, и сами являлись основными станциями-аналогами.

В целом данные по осадкам восстановились хуже, ряды в среднем удалось удлинить на 17 лет. Как следует из Таблицы 2.9, средний период наблюдений за атмосферными осадками удалось увеличить до 77 лет в июне и июле и до 89 лет в феврале и ноябре, причем восстановление в холодные месяцы года было более эффективным.

Таблица 2.9 – Средняя продолжительность (в годах) наблюденных и восстановленных рядов среднемесячной температуры воздуха и атмосферных осадков на метеостанциях, расположенных на территории Республики Саха (Якутия)

Вид данных	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
наблюденные по температуре	69	69	69	69	70	70	69	69	70	70	70	70
восстановленные данные по температуре*	129	133	140	138	141	129	132	129	134	134	129	122
наблюденные по осадкам	67	66	66	66	66	65	65	64	66	66	68	68
восстановленные по осадкам*	88	89	85	79	80	77	77	79	82	86	89	87
*не учитывались станции, по которым данные не восстановились												

Для восстановленных рядов наблюдений вновь был проведен анализ однородности эмпирических распределений на резко отклоняющиеся экстремумы, которые могли появиться за счет отдельных больших погрешностей при применении процедуры восстановления. Результаты

выполненного анализа по критериям Диксона и Смирнова-Грabbса частично представлены в Таблицах 2.10–2.11 (только случаи отклонения гипотезы однородности).

Таблица 2.10 – Результаты оценки однородности восстановленных данных среднемесячных температур воздуха по критериям Диксона и Смирнова-Грabbса

№	Название станции	Месяц	Экстремум	Год	&	Вид экстремума	Исх. Или вос. Д.
1	Анабар	Май	Мах	1959	0,9	РЕДКОЕ СОБЫТИЕ	Вос.
2	Куйга	Март	Мах	1990	2,1	РЕДКОЕ СОБЫТИЕ	Исх.
3	Хабардино	Август	Мах	1998	0,9-2,7	РЕДКОЕ СОБЫТИЕ	Исх.
4	Нюрба	Март	Мах	1990	0,9-2,8	РЕДКОЕ СОБЫТИЕ	Исх.
5	Хатырык-Хомо	Март	Мах	1990	2,3	РЕДКОЕ СОБЫТИЕ	Исх.
6	Мирный	Апрель	Мах	1997	2,1-2,7	РЕДКОЕ СОБЫТИЕ	Исх.
7	Сунтар	Март	Мах	1990	3,0	РЕДКОЕ СОБЫТИЕ	Исх.
8	Чаингда	Март	Мах	1990	2,5	РЕДКОЕ СОБЫТИЕ	Исх.
9	Ленск	Март	Мах	1990	3,0	РЕДКОЕ СОБЫТИЕ	Исх.
10	Андрюшкино	Май	Мах	1979	0,9-1,4	РЕДКОЕ СОБЫТИЕ	Вос.
11	Чульман	Июнь	Мах	2008	0,9-2,6	РЕДКОЕ СОБЫТИЕ	Исх.
12	Алдан	Март	Мах	1990	1,8	РЕДКОЕ СОБЫТИЕ	Исх.
13	Канку	Июнь	Мах	2008	0,9-2,7	РЕДКОЕ СОБЫТИЕ	Исх.
14	Суон-Тит	Июнь	Мах	2008	0,9-1,7	РЕДКОЕ СОБЫТИЕ	Исх.

Таблица 2.11– Оценка однородности восстановленных данных атмосферных осадков по метеостанциям Республики Саха (Якутия) по критериям Диксона и Смирнова-Грabbса

№	Код	Название метеостанции	Мах	№	Код	Название метеостанции	Мах
Январь				Март			
1	21535	Санникова пролив	(-) 1,3–2,6	1	21802	Саскылах	(-) 1,8–2,8
2	31016	Угино	(-) 0,9–2,3				

Выполненный анализ однородности восстановленных данных показал, что эмпирические распределения восстановленных рядов температур за все месяцы не являются однородными в 32 случаях. Из Таблицы 2.10 следует, что гипотеза однородности экстремумов принимается практически во всех случаях (98,6% от общего числа). Для одного случая гипотеза однородности экстремумов отклоняется при $\alpha_p < 1\%$, а еще в 13 случаях может быть условно отклонена при α_p в диапазоне 1–3%.

Еще меньший процент неоднородности был установлен для восстановленных рядов атмосферных осадков, но стоит учитывать то, что процедура восстановления осадков прошла в целом гораздо хуже, чем для температуры.

В результате были подготовлены базы данных многолетних рядов температуры воздуха и атмосферных осадков практически одинаковой продолжительности с включением последних лет наблюдений до 2013 г. для последующего статистического моделирования.

2.2 Оценка климатических изменений температур воздуха и их пространственное обобщение

Моделирование временных рядов было основано на расчете параметров трех основных моделей: модели стационарной выборки и двух альтернативных нестационарных моделей: линейного тренда и ступенчатого изменения средних значений [55; 56; 57]. В качестве основного параметра, по которому осуществлялось сравнение моделей, было выбрано стандартное отклонение остатков, широко применяемое в регрессионном анализе и статистическом оценивании [58; 59]. Для модели стационарной выборки стандартное отклонение от этой модели и является обычным среднеквадратическим отклонением временного ряда (σ_y). Для модели линейного тренда стандартное отклонение остатков может быть рассчитано по известной общей формуле [58]:

$$\sigma_\varepsilon = \sigma_y \sqrt{1 - R^2} \quad , \quad (2.1)$$

где: σ_y – стандартное отклонение исходного ряда (модель стационарного среднего),
 σ_ε – стандартное отклонение остатков относительно модели линейного тренда,
 R – коэффициент корреляции уравнения линейного тренда.

В модели ступенчатых изменений стандартное отклонение остатков для случая одной ступени и двух стационарных интервалов определяется по формуле:

$$\sigma_{\text{ступ}} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2 n_1 + \sigma_2^2 n_2}{(n_1 + n_2 - 1)}} \quad , \quad (2.2)$$

где $\sigma_{\text{ступ}}$ – стандартное отклонение остатков модели ступенчатых изменений,
 σ_1 , σ_2 – стандартные отклонения стационарных отрезков временного ряда; n_1 , n_2 – объемы стационарных отрезков.

Момент ступенчатых изменений (t_n) определяется визуально или на основе дополнительной информации о факторе и дате нарушения стационарности, а также может быть

определен итерациями при достижении минимального значения суммы квадратов отклонений от среднего значения для каждой из двух частей временного ряда:

$$SS = \sum_1^{n1} (Y_i - Y_{1cp})^2 + \sum_{n1+1}^n (Y_i - Y_{2cp})^2 = \min \quad (2.3)$$

где $n1$ – объем первой стационарной подвыборки; SS - сумма квадратов отклонений.

Для количественной оценки отличий модели тренда и модели ступенчатых изменений от модели стационарного среднего рассчитываются их относительные отклонения по формулам:

$$\Delta_{mp} = \left(\frac{\bar{\sigma}_y - \sigma_{\bar{y}}}{\bar{\sigma}_y} \right) * 100\% \quad , \quad (2.4)$$

$$\Delta_{cmyн} = \left(\frac{\sigma_y - \sigma_{cmyн}}{\sigma_y} \right) * 100\% \quad , \quad (2.5)$$

где: $\Delta_{тр}$, $\Delta_{ступ}$ – относительные отклонения или отличия (в %) модели тренда и модели ступенчатых изменений от модели стационарной выборки,

σ_y , $\sigma_{\bar{y}}$, $\sigma_{ступ}$ – стандартные отклонения остатков соответственно моделей случайной выборки, линейного тренда и ступенчатых изменений.

В первом приближении можно считать, что если относительное отклонение превышает 10%, то нестационарная модель является эффективнее стационарной. Однако правильнее, когда это отличие от стационарности является не только существенным, но еще и статистически значимым. Для оценки статистической значимости монотонных (трендовых) и ступенчатых изменений во временных рядах был применен критерий Фишера [58; 60], показывающий, насколько статистически значимо отличаются остаточные дисперсии выбранных моделей от дисперсии временного ряда (стационарной модели). Статистики критерия Фишера для каждой из двух конкурирующих моделей по отношению к модели стационарной выборки вычисляются по формулам:

$$F_{TP} = \frac{\sigma^2_Y}{\sigma^2_{\varepsilon}} \quad , \quad (2.6)$$

$$F_{СТУП} = \frac{\sigma^2_Y}{\sigma^2_{cmyн}} \quad (2.7)$$

В числителе всегда будет дисперсия исходного ряда наблюдений, так как она является наибольшей или, по крайней мере, равна остаточной дисперсии конкурирующей модели. В случае если расчетное значение статистики Фишера оказывается больше критического, то

дисперсии двух моделей имеют статистически значимое различие и соответствующая модель (тренда или ступенчатых изменений) статистически эффективнее, чем модель стационарной выборки.

По приведенной методике были рассчитаны отличия нестационарных моделей от стационарной в % по формулам (2.4) и (2.5) и статистики критерия Фишера по формулам (2.6) и (2.7) с последующей оценкой их статистической значимости для всех рядов среднемесячных температур воздуха на 96 метеостанциях в Республике Саха (Якутия). С целью оценки устойчивости получаемых результатов расчеты осуществлялись для трех типов массивов данных:

- ряды температуры воздуха, приведенные к многолетнему периоду включающие восстановленные данные за весь многолетний период;
- исходные ряды наблюдений температуры воздуха для оценки эффективности выводов, получаемых по восстановленным рядам;
- ряды температуры воздуха с 1960 по 2013-е гг. для оценки стабильности полученных выводов за последний период времени.

Пример рассчитанных показателей оценки эффективности нестационарных моделей по отношению к модели стационарной выборки приведен в Табл.2.12 для января и только для случаев, когда отличие от стационарной модели составляло 10% и более. В Табл.2.12 также приводятся рассчитанные статистики критериев Фишера ($F_{ст}$) и Стьюдента ($St_{ст}$) для двух частей временного ряда по дате ступенчатого изменения из формулы (2.3), годы начала ($T_{нач}$) и окончания наблюдений ($T_{кон}$), год ступенчатого изменения ($T_{ступ.}$), период наблюдений в годах (N), и коэффициент корреляции уравнения линейного тренда ($R_{тр}$). В Табл.2.12 выделены жирным шрифтом эффективные Δ и статистически значимые F и $R_{тр}$.

Таблица 2.12 – Характеристики эффективных нестационарных моделей для среднемесячной температуры января и многолетних восстановленных рядов на территории Республики Саха (Якутия)

Код ВМО	$\Delta_{тр}$ %	$\Delta_{ступ}$ n%	$F_{тр}$	$F_{ступ}$ n	$F_{ст}$	$St_{ст}$	$T_{ступ.}$	$T_{нач.}$	$T_{кон.}$	N	$R_{тр}$
Январь											
24194	10,9	11,1	1,26	1,26	3,26	3,51	1920	1900	2013	108	0,45
24382	8,7	10,7	1,2	1,25	1,48	3,82	1974	1927	2013	87	0,41
24753	8,5	11,2	1,19	1,27	1,44	4,56	1991	1920	2013	91	0,4
24763	4,3	10,8	1,09	1,26	1,71	4,24	1991	1932	2013	82	0,29
24768	7,9	10,6	1,18	1,25	1,46	4,79	1991	1910	2013	101	0,39
24871	7,7	11,7	1,17	1,28	1,59	4,15	1993	1935	2013	78	0,39
24959	6,6	10	1,15	1,24	1,45	5,83	1973	1830	2013	167	0,36
24966	14	26,2	1,35	1,84	2,73	6,57	1974	1894	2013	102	0,51
30393	18	22,7	1,49	1,67	3,18	4,64	1962	1926	2013	86	0,57

Далее представим в графической форме примеры нестационарных рядов температуры на Рисунке 2.4.

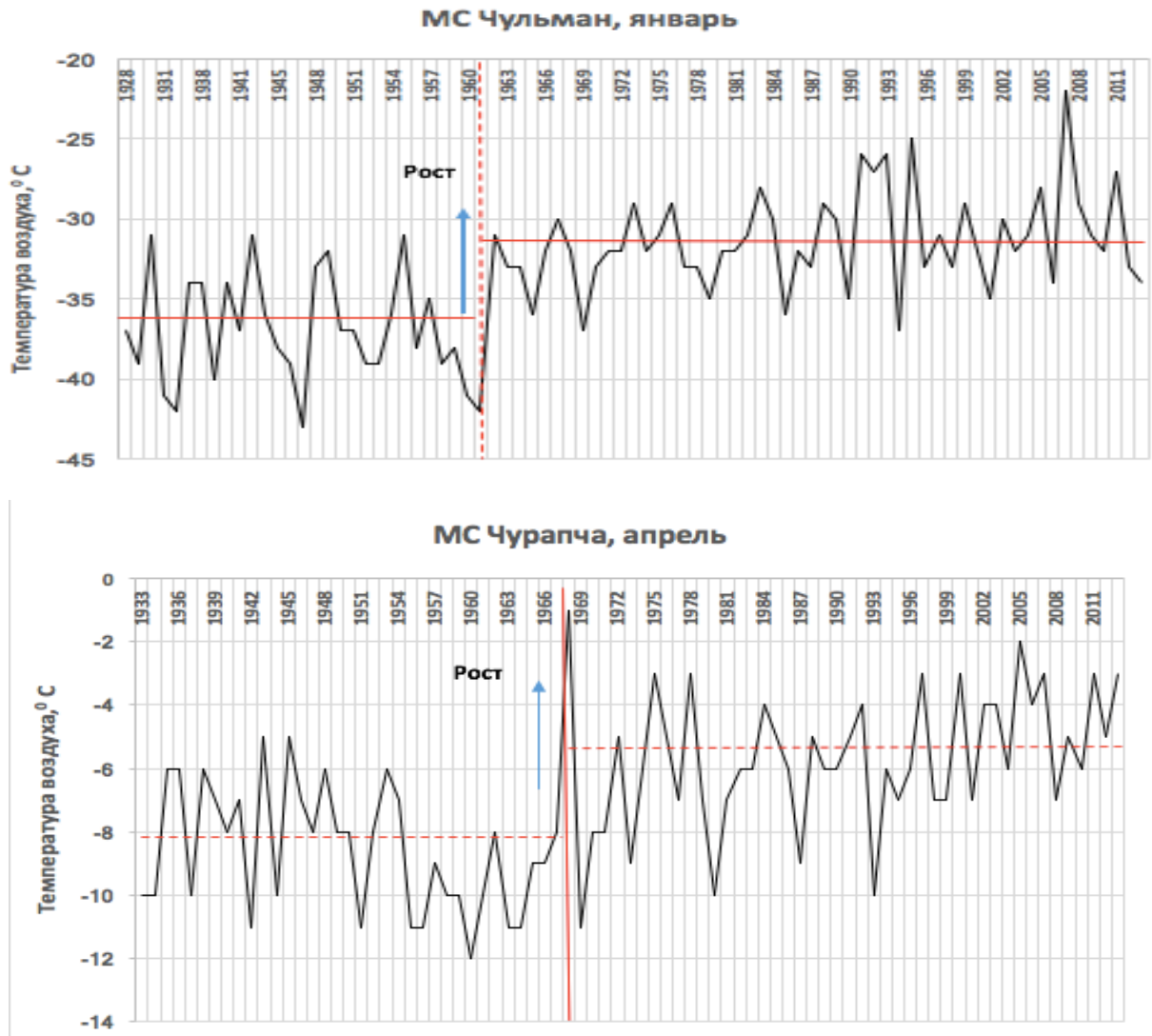


Рисунок 2.4 – Примеры нестационарных рядов температуры в Якутии

Все полученные результаты по оценке эффективности нестационарных моделей в обобщенном виде для трех массивов данных: приведенные к многолетнему периоду, исходные наблюдаемые и данные за последний период 1960–2013 гг., показаны в Таблицах 2.13–2.15 соответственно, в которых $\Delta_{стун}$ и $\Delta_{мп}$ – среднее отклонение от стационарной модели (в %) по всем рядам, %н – процент эффективных нестационарных моделей от общего числа рядов данного месяца для которых $\Delta > 10\%$, n_F – число рядов со статистически значимыми нестационарными моделями по критерию Фишера.

Таблица 2.13 – Показатели эффективности нестационарных моделей среднемесячных температур воздуха в Республике Саха (Якутия) для рядов, приведенных к многолетнему периоду

Показатель	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	модель ступенчатых изменений											
$\Delta_{стун}$	5,9	2,9	4,2	8,2	9,1	6,5	3,5	3,8	2,5	2,9	3,6	3,2
%н	9,4	–	1,0	36,5	34,4	19,8	–	3,1	2,1	4,2	1,0	2,1
n _F	2	–	–	7	4	–	–	2	1	1	–	2
	модель линейного тренда											
$\Delta_{лр}$	3,7	1,3	2,5	6,8	8,2	3,6	1,4	1,4	0,8	0,9	1,2	1,5
%н	3,1	–	–	28,1	36,5	3,1	–	1,0	1,0	–	–	–
n _F	1	–	–	5	9	–	–	1	–	–	–	–

Таблица 2.14 – Показатели эффективности нестационарных моделей среднемесячных температур воздуха в Республике Саха (Якутия) для исходных рядов наблюдений

Показатель	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	модель ступенчатых изменений											
$\Delta_{стун}$	6,0	4,7	4,6	8,2	8,8	7,7	5,6	4,3	3,2	4,5	5,8	3,7
%н	14,6	6,3	8,3	26,0	31,3	30,2	4,2	4,2	4,2	7,3	15,6	2,1
n _F	3	1	–	2	–	–	–	2	1	1	–	2
	модель тренда											
$\Delta_{лр}$	3,7	1,8	2,6	6,3	7,7	5,0	2,8	1,9	1,0	1,6	3,0	1,9
%н	6,3	1,0	2,1	15,6	29,2	11,5	2,1	2,1	–	1,0	5,2	2,1
n _F	2	1	–	1	1	–	–	–	–	–	1	–

Таблица 2.15 – Показатели эффективности нестационарных моделей среднемесячных температур воздуха в Республике Саха (Якутия) за период с 1960 по 2013 гг.

Показатель	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	модель ступенчатых изменений											
$\Delta_{стун}$	5,8	5,5	5,2	8,7	9,3	9,3	6,6	5,3	3,7	5,7	7,6	4,0
%н	12,5	9,4	12,5	28,1	36,5	49,0	15,6	8,3	2,1	12,5	24,0	7,3
n _F	–	1	–	–	–	–	–	–	–	–	3	–
	модель тренда											
$\Delta_{лр}$	3,4	1,7	2,9	7,8	9,1	7,3	3,9	2,9	1,4	3,0	4,8	1,8
%н	1,0	1,0	2,1	26,0	40,6	31,3	3,1	1,0	1,0	7,3	11,5	–
n _F	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1	–

Как следует из данных Таблицы 2.13, средний территориальный процент отклонений от стационарной модели больше для модели ступенчатых изменений (4,7%), чем для модели линейного тренда (2,8%), также, как и процентное число нестационарных моделей ступенчатых изменений (9,5%) больше, чем модели линейного тренда (6,1%) почти в 2 раза. Поэтому можно

сделать вывод, что модель ступенчатых изменений эффективнее, чем модель линейного тренда. В то же время по абсолютной величине как средний процент, так и число нестационарных моделей невелики, о чем и свидетельствует малое количество статистически значимых нестационарных моделей, которое изменяется внутри года от 1 до 7–9 случаев из 96, что меньше 1%.

Динамика нестационарности внутри года имеет максимум в апреле-мае, когда нестационарными являются более 1/3 всех рядов наблюдений, а в феврале и июле нестационарность полностью отсутствует. В другие месяцы года процент нестационарных рядов составляет от 1% в марте и ноябре до 4,2% в октябре. Исключение составляет январь, где процент нестационарных рядов несколько выше – 9,4% и формирует как бы второй максимум нестационарности внутри года.

Если сопоставить результаты, полученные за весь наиболее продолжительный период наблюдений в среднем 130–140 лет, включающий как наблюдаемые, так и восстановленные данные (Таблица 2.13) с результатами только данных наблюдений (Таблица 2.14) со средней продолжительностью 70 лет, то результаты динамики нестационарности внутри года будут уже более существенны. Для наблюдаемых рядов внутригодовой ход нестационарности представлен уже двумя максимумами: наиболее существенный в апреле – июне на 30% метеостанций и второй примерно в два раза меньше – в ноябре и январе на 15–16% метеостанций от общего их числа. Наиболее стационарными являются месяцы с июля по сентябрь (4,2% нестационарных моделей) и в холодный период: декабрь, февраль. Поэтому нестационарность за последний период в 70 лет более существенна, чем за весь многолетний период в 130–140 лет.

Если рассмотреть результаты только за последние 54 года (Таблица 2.15), то весенний максимум нестационарности (апрель-июнь) будет охватывать уже почти половину метеостанций, а второй зимний максимум – до четверти метеостанций в ноябре. При этом существенно повысится и средний процент нестационарных рядов с 9,5% за весь многолетний период до 18% в последние годы. Причем отличие для периодов в 130 лет и 70 лет по среднему проценту нестационарных рядов не столь велико: 9,5% и 12,9%, а в последние годы оно выросло много больше (до 18%). В результате сопоставления трех разных периодов (130 лет, 70 лет и последние 54 года) можно сделать вывод, что доля рядов с нестационарными моделями существенно выросла в последние годы, как во все месяцы, так и особенно в весенний период, причем максимум нестационарности сместился с апреля-мая на июнь.

Чтобы выяснить в какой части территории Республики Саха (Якутия) имеют место нестационарные модели, были построены пространственные распределения $\Delta_{стун}$ для месяцев, где эти отличия от стационарности являются наиболее эффективными (апрель, май, июнь и январь) для данных за весь наиболее продолжительный период, включающий как наблюдаемые,

так и восстановленные температуры воздуха. Эти пространственные распределения показаны на Рисунке 2.5, где оттенками красного выделена территория с $\Delta_{стун} > 10\%$, а оттенками зеленого и фиолетового – территория со стационарными моделями.

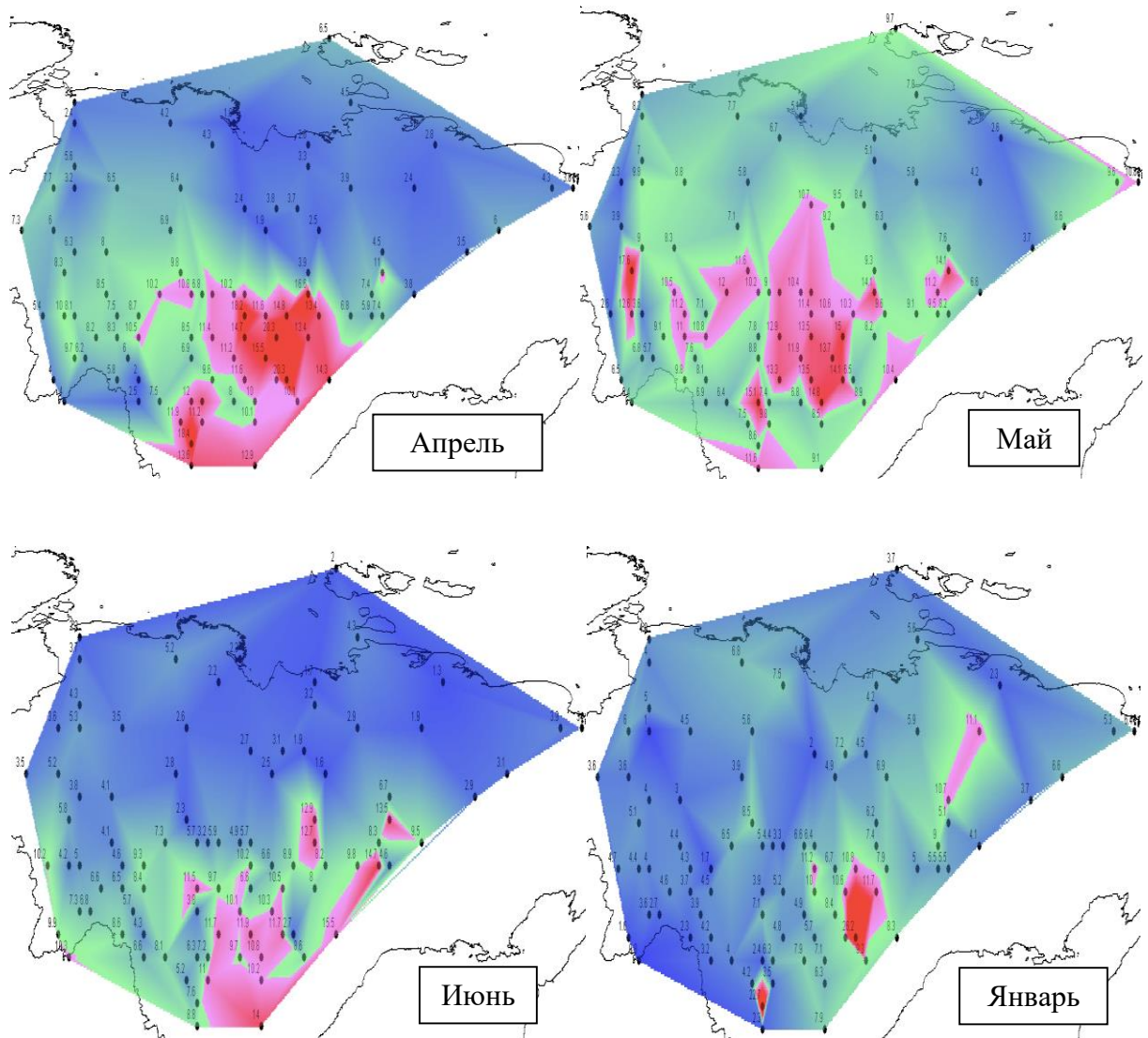


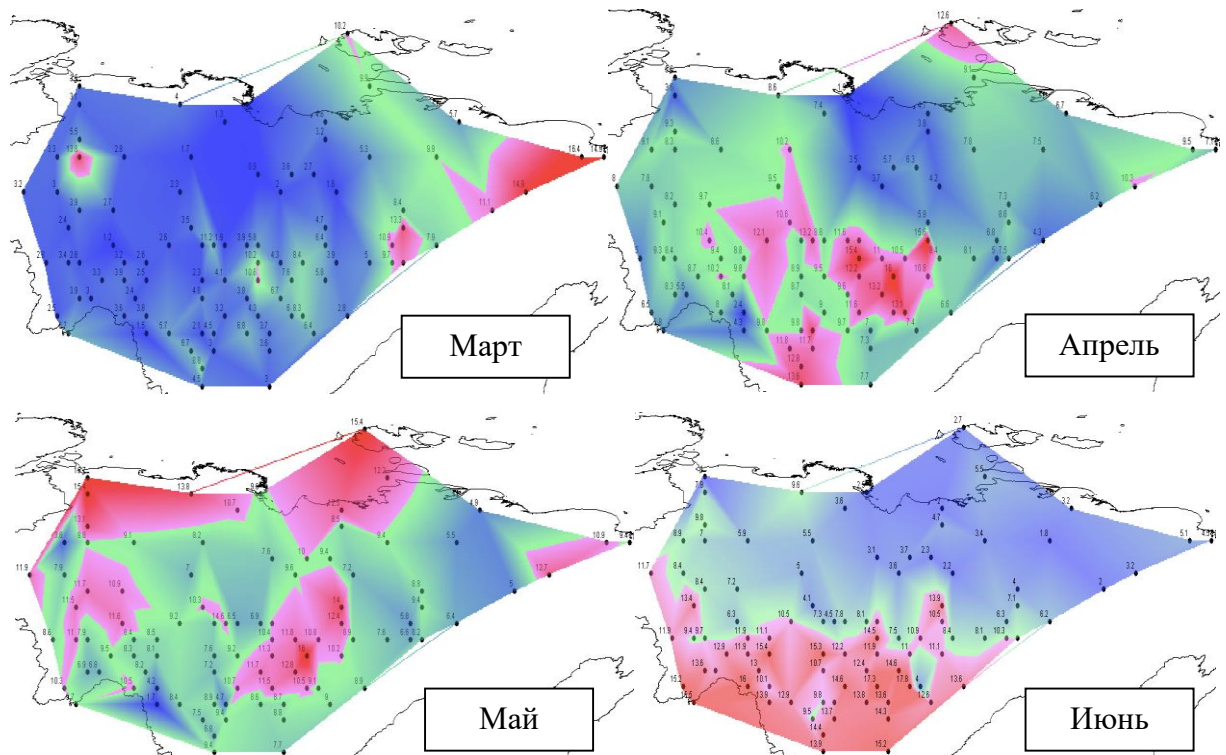
Рисунок 2.5 – Пространственное распределение отклонений от нестационарности $\Delta_{стун}$ в % для среднемесячной температуры за многолетний период с восстановленными и наблюдаемыми данными (пределы изменения $\Delta_{стун}$ по цветам: фиолетовый – 0–5,9; розовый – 6,0–9,9; красный > 10,0)

Как следует из Рисунка 2.5, область нестационарности на территории Республики Саха (Якутия) начинает формироваться в апреле на юго-востоке и занимает до 30% территории. В мае область нестационарности смещается к центру республики и распадается на отдельные очаги, занимая больше половины площади и затем в июне снова уменьшается и смещается на юго-восток, охватывая не более четверти территории. К июлю территория республики становится практически полностью стационарной и в августе нестационарность встречается уже только

точечно на трех отдельных метеостанциях: пролив Санникова, Туой-Хая и Усть-Мая. В переходный осенний сезон (сентябрь) территория республики полностью стационарна, за исключением двух станций Туой-Хая и Усть-Мая, где она может быть обусловлена локальными причинами. Пространственное распределение $\Delta_{стун}$ января, где средний процент нестационарных рядов также на уровне месяцев переходного периода и равен 9,4%, области нестационарности проявляются в виде отдельных очагов на востоке. В общем же в остальные месяцы года, не приведенные на Рис.2.5 отдельные случаи нестационарности наблюдаются на 3–4 метеостанциях, которые расположены в разных частях республики и вызваны скорее всего локальными, а не климатическими причинами.

Также результаты анализа показали, что ступенчатый рост температуры имеет место в основном в начале – середине 1960–1980-х годов.

В связи с тем, что во вторую половину инструментальных наблюдений с 1960-го года число эффективных нестационарных рядов существенно увеличилось (Таблица 2.15), были построены пространственные распределения $\Delta_{стун}$ за каждый месяц и некоторые из них с наибольшим процентом нестационарных рядов показаны на Рисунке 2.6. Как и за весь период наблюдений в месяцы переходного и теплого периода года (апрель-июнь) нестационарность охватывает южную и центральную области Якутии, занимая более половины ее южной части в июне. В тоже время, чего не наблюдалось ранее, в месяцы холодного периода года (октябрь, ноябрь, март) нестационарность охватывает северо-восток Якутии и наиболее выражена в ноябре.



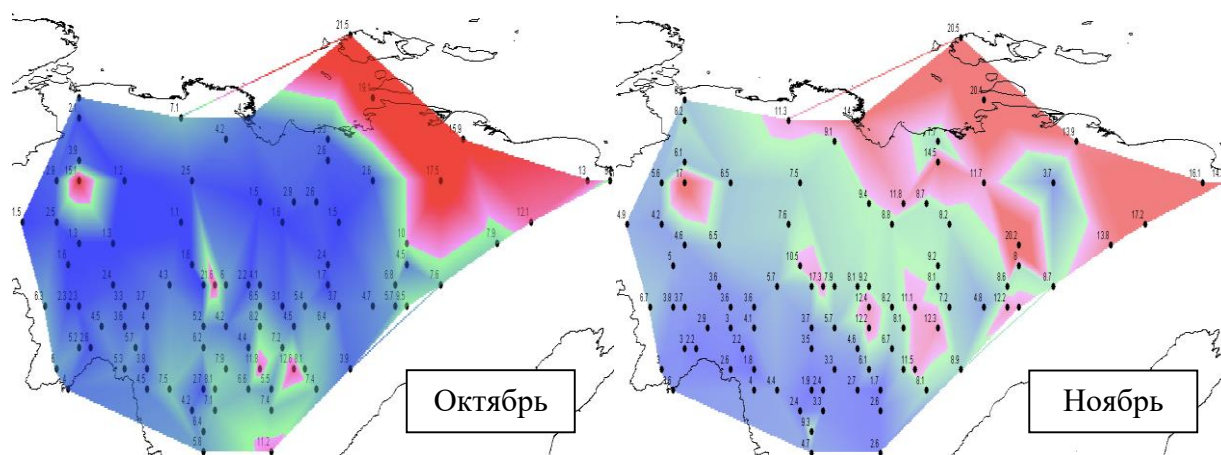


Рисунок 2.6 – Пространственное распределение отклонений от нестационарности $\Delta_{стун}$ в % для среднемесячной температуры отдельных месяцев года за период 1960–2013 гг.

(пределы изменения $\Delta_{стун}$ по цветам: фиолетовый – 0–5,9; розовый – 6,0–9,9; красный > 10,0)

Территориальная динамика нестационарности внутри года состоит в том, что, начиная с апреля резко увеличивается ее область, которая занимает к июню более половины территории, смещаясь на юг. Далее в июле-августе нестационарность резко ослабевает и становится очаговой (точечной), а к сентябрю полностью исчезает. Затем в октябре нестационарность вновь появляется на северо-востоке и в ноябре охватывает уже до половины территории на севере и востоке. В декабре территория вновь становится стационарной и до февраля наблюдается только точечная нестационарность на северо-востоке, которая в марте усиливается и начинает далее расширяться и смещаться в центр и на юго-восток.

Таким образом, в последний период внутри года наблюдается два территориальных максимума нестационарности: в апреле – южный и в ноябре – северо-восточный.

В результате можно сделать вывод, что потепление сказывается не только в месяцы переходного периода весной, но в холодные осенние месяцы, о чем также свидетельствуют и модели изменений климата, по которым зимнее потепление является самым существенным.

Предлагаемая методика оценки эффективности вида модели временного ряда является статистически обоснованной, но в тоже время имеет место и известная стратегия оценки стационарности, основанная на сравнении средних значений и дисперсий двух частей временного ряда по статистическим критериям Стьюдента и Фишера соответственно [61]. Поэтому было интересно сопоставить процент полученных нестационарных моделей по одной и другой методике. При этом, разбиение временного ряда на две части осуществлялось по формуле (2.3), то есть заведомо задавались самые благоприятные условия для отличия средних значений.

Полученные результаты оценки стационарности по статистическим критериям Фишера и Стьюдента, а также статистической значимости коэффициентов корреляции линейного тренда

приведены в Таблице 2.16, в которой n_F – число рядов со статистически значимой нестационарностью дисперсий двух частей временного ряда по критерию Фишера, n_{St} – число рядов со статистически значимой нестационарностью средних значений двух частей временного ряда по критерию Стьюдента, n_R – число рядов со статистически значимыми коэффициентами корреляции линейного тренда и n_H – число рядов с эффективной нестационарной моделью ступенчатых изменений при отличии от стационарной модели более, чем на 10%.

Таблица 2.16 – Число нестационарных рядов наблюдений среднемесячных температур воздуха в Республике Саха (Якутия), полученных разными методами за период наблюдений с 1960 по 2013-е гг.

Показатель	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
n_F	2	8	36	6	40	33	9	10	7	9	16	20
n_{St}	52	49	41	91	91	78	73	59	36	51	67	26
n_R	36	9	23	85	85	69	40	25	9	18	51	12
$n_H(>10\%)$	12	9	12	27	35	47	15	8	2	12	23	7

По результатам Таблицы 2.16 можно сделать вывод, что из трех методов оценки стационарности средних значений (критерий Стьюдента, линейный тренд и модель ступенчатых изменений) наибольшее число нестационарных рядов выявлено по критерию Стьюдента, а наименьшее – по эффективной модели ступенчатых изменений. В данном случае завышенный процент нестационарных средних по критерию Стьюдента связан с тем, что дата разбиения на подвыборки задана по наибольшему возможному расхождению средних внутри выборки, что является искусственной процедурой для статистического критерия. Статистическая значимость коэффициента линейного тренда зависит от продолжительности ряда и при длине ряда 54 года статистическим значимым при 5%-ном уровне значимости будет уже коэффициенты корреляции, начиная с $R=0,26$, что еще дает недостаточно эффективную модель временного ряда, так как показатель детерминации будет всего около 7%.

Вместе с тем, период с наибольшей нестационарностью приходится у всех трех методов на апрель-июнь, хотя максимум может варьировать от мая до июня. Второй всплеск нестационарности внутри года также по всем трем методам приходится на ноябрь и частично – январь. Число же нестационарных дисперсий, установленных по критерию Фишера, также имеет максимум весной.

По выполненной работе можно сделать следующие основные выводы:

- многолетние ряды среднемесячных температур воздуха на территории Якутии не являются стационарными и процент нестационарных рядов увеличивается в последнее время;

- из двух рассмотренных нестационарных моделей модель ступенчатых изменений является более эффективной (почти в два раза) для описания межгодовых изменений температуры воздуха по сравнению с широко применяемой в настоящее время моделью линейного тренда и ступенчатый рост температуры относится в большинстве случаев к 1960–1980-м годам;
- во внутригодовом распределении нестационарности имеют место два максимума: в переходный период от зимы к лету (апрель-июнь) и в начале зимнего периода (октябрь-ноябрь);
- территориально весенний и осенний максимумы нестационарности располагаются в разных частях территории Якутии: весенне-летний – на юге, осенне-зимний – на северо-востоке;
- при сравнении с методами оценки стационарности (критерий Стьюдента и статистическая значимость линейного тренда) получены аналогичные выводы о динамике нестационарности внутри года, что и по модели ступенчатых изменений [62].

2.3 Климатические изменения осадков и их пространственное обобщение

По приведенной ранее для рядов температуры воздуха методике были рассчитаны отличия нестационарных моделей от стационарной модели в % и статистики критерия Фишера с последующей оценкой их статистической значимости для всех рядов среднемесячных атмосферных осадков на 96 метеостанциях Республики Саха (Якутия) только за период наблюдений 1966–2013 гг. Выбор только одного последнего периода связан с тем, неоднородность, связанная с заменой дождемера на осадкомер в 1950–60-х годах, в нем исключена.

Рассчитанные показатели оценки эффективности нестационарных моделей по отношению к модели стационарной выборки приведены в Таблице 2.17 только для случаев, когда отличие от стационарной модели составляло 10% и более. В Табл.2.17 также приводятся рассчитанные статистики критериев Фишера ($F_{ст.}$) и Стьюдента ($St_{ст.}$) для двух частей временного ряда по дате ступенчатого изменения, годы начала ($T_{нач}$) и окончания наблюдений ($T_{кон}$), год ступенчатого изменения ($T_{ступ.}$), период наблюдений в годах (N) и коэффициент корреляции уравнения линейного тренда ($R_{тр.}$). Жирным шрифтом отмечены эффективные Δ и статистически значимые F и $R_{тр.}$.

Таблица 2.17 – Эффективные нестационарные модели и их характеристики (среднемесячные атмосферные осадки, Республика Саха (Якутия))

Код ВМО	$\Delta_{тр}$ %	$\Delta_{ступ}$ %	$F_{мп}$	$F_{ступ}$	$F_{ст}$	$St_{ст}$	$T_{ступ}$	$T_{нач.}$	$T_{кон.}$	N	$R_{тр}$
январь											
21608	5,3	18,7	1,11	1,51	3,71	5,41	2003	1966	2013	48	0,32
24194	20,7	25	1,59	1,78	1,5	-3,56	1982	1966	2013	48	-0,61
24266	7,9	11,3	1,18	1,27	1,23	-2,44	1980	1966	2013	48	-0,39
24343	17,5	19,4	1,47	1,54	2,45	4,58	2001	1966	2013	48	0,56
24382	16,9	15,7	1,45	1,41	1,29	-3,2	1986	1966	2013	48	-0,56
24585	10,4	11,5	1,24	1,28	29,9	2,8	1990	1966	2013	48	0,44
24588	10,3	11,1	1,24	1,27	1,19	-2,58	1980	1966	2013	48	-0,44
24679	14,2	22	1,36	1,65	1,03	-3,39	1982	1966	2013	47	-0,51
24688	14,1	13,7	1,36	1,34	1,52	-2,88	1981	1966	2013	48	-0,51
25017	24,1	36,6	1,74	2,49	5,13	-3,59	1990	1970	2013	43	-0,65
25121	26,5	23,1	1,85	1,69	1,39	-3,26	1980	1966	2013	48	-0,68
25123	10,2	10,9	1,24	1,26	1	-2,46	1983	1966	2013	48	-0,44
25206	19,8	20,8	1,55	1,6	1,87	-3,38	1989	1966	2013	48	-0,6
25400	13,3	17,8	1,33	1,48	1,27	-2,99	1983	1966	2013	48	-0,5
февраль											
21608	10	11,8	1,23	1,29	15,7	2,3	1999	1983	2013	31	0,43
21813	5,2	13,9	1,11	1,35	1,36	-3,31	1998	1966	2013	48	-0,32
24125	4,7	13,1	1,1	1,32	6,98	2,44	1978	1966	2013	48	0,3
24194	10,5	9,7	1,25	1,23	1,06	-2,71	1995	1966	2013	48	-0,45
24219	6,8	13,3	1,15	1,33	2,55	3,47	1995	1966	2013	48	0,36
24261	7	11,1	1,16	1,26	1,05	-2,28	1979	1966	2013	48	-0,37
24322	4,3	10,9	1,09	1,26	3,97	2,46	1986	1966	2013	48	0,29
24641	6,3	10	1,14	1,23	9,63	3,11	1978	1966	2013	48	0,35
24679	14,8	22,7	1,38	1,68	1,78	-4,1	1998	1966	2013	48	-0,52
24688	7,4	12,2	1,17	1,3	1,27	-2,96	1995	1966	2013	48	-0,38
24725	6,9	10,3	1,15	1,24	1,81	3,12	1997	1966	2013	48	0,36
24826	10,9	13,8	1,26	1,35	4,04	3,22	1992	1966	2013	48	0,45
24923	9,9	11,5	1,23	1,28	3,31	2,91	1989	1966	2013	48	0,43
25017	9,3	13,8	1,22	1,35	1,21	-2,72	1995	1975	2013	39	-0,42
25121	19,1	18,8	1,53	1,52	1,65	-3,27	1983	1966	2013	48	-0,59
30054	11,7	14,1	1,28	1,36	3,02	3,08	1989	1966	2013	48	0,47
30173	7,8	10,1	1,18	1,24	3,15	3,41	1999	1966	2013	48	0,39
март											
21813	4	11,8	1,08	1,28	1,12	-2,93	1994	1966	2013	48	-0,28
24826	4,5	12,2	1,1	1,3	3,34	2,77	1985	1966	2013	48	0,3
24923	3,5	12,2	1,07	1,3	3,46	2,82	1989	1966	2013	48	0,26
апрель											
21813	6,2	13,5	1,14	1,34	1,36	-2,9	1992	1966	2013	48	-0,35
24111	4,9	12,4	1,11	1,3	2,03	-2,41	1976	1966	2013	48	-0,31
24261	7,8	18,5	1,18	1,5	2,95	-2,43	1976	1966	2013	48	-0,39
май											
24738	8,3	12,2	1,19	1,3	6,51	2,99	1991	1966	2013	48	0,4
24739	8,8	12,1	1,2	1,3	9,62	3,13	1992	1966	2013	48	0,41
24933	12	16,2	1,29	1,42	5,33	3,95	1996	1966	2013	48	0,47
30173	9,6	10	1,22	1,23	3,65	3,17	1996	1966	2013	48	0,43
июнь											
21802	9,9	14	1,23	1,35	1,51	-2,54	1979	1966	2013	47	-0,43
21813	12,9	16	1,32	1,42	1,64	-2,33	1976	1966	2013	45	-0,49
24143	8,5	12,3	1,19	1,3	4,77	2,83	1986	1966	2013	48	0,4
24194	9,4	12,5	1,22	1,3	1,5	-2,36	1979	1966	2013	48	-0,42
24538	12,9	21,9	1,32	1,64	3	5,11	2002	1966	2013	48	0,49
24944	6,2	11,6	1,14	1,28	1,57	-2,6	1985	1966	2013	48	-0,35

Продолжение таблицы 2.17

25206	7,2	15,9	1,16	1,41	2,02	4,15	2003	1966	2013	48	0,37
25400	7,5	18	1,17	1,49	2,45	4,46	2002	1966	2013	48	0,38
июль											
21802	11,1	14,7	1,27	1,37	1,51	-2,92	1984	1966	2013	48	-0,46
24656	3	13,1	1,06	1,32	1,75	3,77	2003	1966	2013	48	0,24
24739	3,6	11,5	1,07	1,28	2,77	3,36	1997	1966	2013	48	0,26
24856	1,8	10	1,04	1,24	2,1	3,48	2003	1966	2013	48	0,19
август											
21921	5,7	13,2	1,12	1,33	3,75	2,52	1983	1966	2013	48	0,33
24219	4,1	10,3	1,09	1,24	2,85	3,18	1996	1966	2013	48	0,28
24758	3,1	10,6	1,07	1,25	2,9	3,77	2003	1966	2013	48	0,25
25123	4,5	14,5	1,1	1,37	5,58	2,85	1988	1966	2013	48	0,3
31004	4,1	10,3	1,09	1,24	1,46	3,22	2003	1966	2013	48	0,29
31016	3,4	11,1	1,07	1,27	1,74	3,59	2003	1966	2013	48	0,26
сентябрь											
24111	5,1	11,6	1,11	1,28	2,24	3,73	2002	1966	2013	48	0,32
24449	2,1	10,6	1,04	1,25	4,28	3,33	1996	1966	2013	47	0,21
24661	6,5	10	1,14	1,23	1,95	2,84	1993	1966	2013	48	0,35
24668	6,9	13,5	1,15	1,34	3,48	3,62	1996	1966	2013	48	0,36
24679	3,7	10,6	1,08	1,25	2,18	3,21	1998	1966	2013	48	0,27
24771	3,3	10,8	1,07	1,26	1,77	3,09	1995	1966	2013	48	0,25
24975	3,5	10,4	1,07	1,25	1,75	3,11	1996	1966	2013	48	0,26
30054	4,2	11,3	1,09	1,27	1,97	3,54	2001	1966	2013	48	0,29
октябрь											
24111	7,9	11,5	1,18	1,28	1,3	-3,18	1996	1966	2013	48	-0,39
24143	0,3	10,1	1,01	1,24	3,61	-1,64	1976	1966	2013	48	-0,07
24343	8,3	10,2	1,19	1,24	9,42	2,67	1990	1966	2013	48	0,4
30393	9,1	15,1	1,21	1,39	7,8	4	1996	1966	2013	48	0,42
31102	7,1	12,1	1,16	1,29	2,47	3,75	2001	1966	2013	48	0,37
ноябрь											
21608	7,1	15,4	1,16	1,4	1,87	3,9	1999	1966	2013	48	0,37
31016	6,3	13,7	1,14	1,34	4,59	4,35	2001	1966	2013	48	0,35
декабрь											
21535	6,6	10,7	1,15	1,25	5,55	3,07	1993	1966	2013	47	0,36
21908	9,7	10,5	1,23	1,25	1,62	-3	1997	1966	2013	48	-0,43
24111	7,5	11,2	1,17	1,27	1,56	-2,61	1986	1966	2013	45	-0,38
24194	7,4	16,6	1,17	1,44	1,19	-2,54	1976	1966	2013	48	-0,38
24266	8,1	11	1,18	1,26	1,23	-2,71	1989	1966	2013	48	-0,39
24639	12,1	13	1,3	1,32	1,36	-3,42	2000	1966	2013	48	-0,48
24661	5,6	10,6	1,12	1,25	1,04	-2,77	1994	1966	2013	48	-0,33
24753	7	11,1	1,16	1,26	1,41	-2,92	1994	1966	2013	48	-0,37
24768	7,2	11	1,16	1,26	1,52	-2,89	1994	1966	2013	48	-0,37
24856	14,2	17,4	1,36	1,47	1,71	-3,29	1991	1966	2013	48	-0,51
24959	8	12,6	1,18	1,31	1,25	-3,14	1994	1966	2013	48	-0,39
24962	9,2	11,7	1,21	1,28	1,63	-2,92	1994	1966	2013	48	-0,42

В более обобщенном виде результаты моделирования представлены в Таблице 2.18, где $\Delta_{стун}$ и $\Delta_{тр}$ – среднее отклонение от стационарной модели (в %) по всем рядам, %н – процент эффективных нестационарных моделей от общего числа рядов данного месяца, для которых $\Delta >$ Фишера.

Таблица 2.18 – Средние территориальные значения показателей эффективности нестационарных моделей среднемесячных атмосферных осадков за период с 1966 по 2013 гг. по Республике Саха (Якутия)

Показатель	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Модель ступенчатых изменений											
$\Delta_{стун}$	5,8	6,1	3,9	4,3	4,0	4,2	3,6	4,7	5,1	4,1	3,8	6,1
%н	14,6	16,7	3,1	3,1	4,2	8,3	4,2	6,3	8,3	5,2	2,1	12,5
пф	2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	Модель линейного тренда											
$\Delta_{лп}$	3,2	3,2	1,1	1,3	1,7	1,6	1,5	1,6	1,7	1,6	1,3	2,7
%н	12,5	6,3	–	–	1,0	2,1	1,0	–	–	–	–	2,1
пф	2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Как следует из Таблицы 2.18, средний территориальный процент отклонений от стационарной модели больше для модели ступенчатых изменений (4,6%), чем для модели линейного тренда (1,9%), также, как и процентное число нестационарных моделей ступенчатых изменений (7,4%) больше, чем модели линейного тренда (2,1%) почти в четыре раза. Поэтому можно сделать вывод, что модель ступенчатых изменений в целом эффективнее, нежели чем модель линейного тренда. В то же время по абсолютной величине, как средний процент, так и число нестационарных моделей невелики, о чем свидетельствует малое количество статистически значимых нестационарных моделей, которое изменяется внутри года от 1 до 14–16 случаев из 96.

Динамика нестационарности внутри года имеет максимум в декабре-феврале, когда нестационарными являются более 10% всех рядов наблюдений, причем по знаку коэффициента корреляции линейного тренда (Таблица 2.17) преобладает уменьшение осадков, хотя есть и их рост. В другие месяцы года процент нестационарных рядов составляет от 2,1% в ноябре до 8,3% в июне и сентябре, когда формируется как-бы второй максимум нестационарности внутри года – но уже в течение теплого сезона года. Также следует, что ступенчатый рост/ ступенчатое снижение осадков наблюдались чаще всего в 1980–1990-е гг. (Таблица 2.17).

Чтобы выяснить в какой части территории Республики Саха (Якутия) имеют место нестационарные модели, были построены пространственные распределения $\Delta_{стун}$ для месяцев, где эти отличия от стационарности являются наиболее существенными (декабрь, январь, февраль, сентябрь). Эти пространственные распределения показаны на Рисунке 2.7, где оттенками красного выделена территория с $\Delta_{стун} > 10\%$, а оттенками зеленого и синим – территория со стационарными моделями.

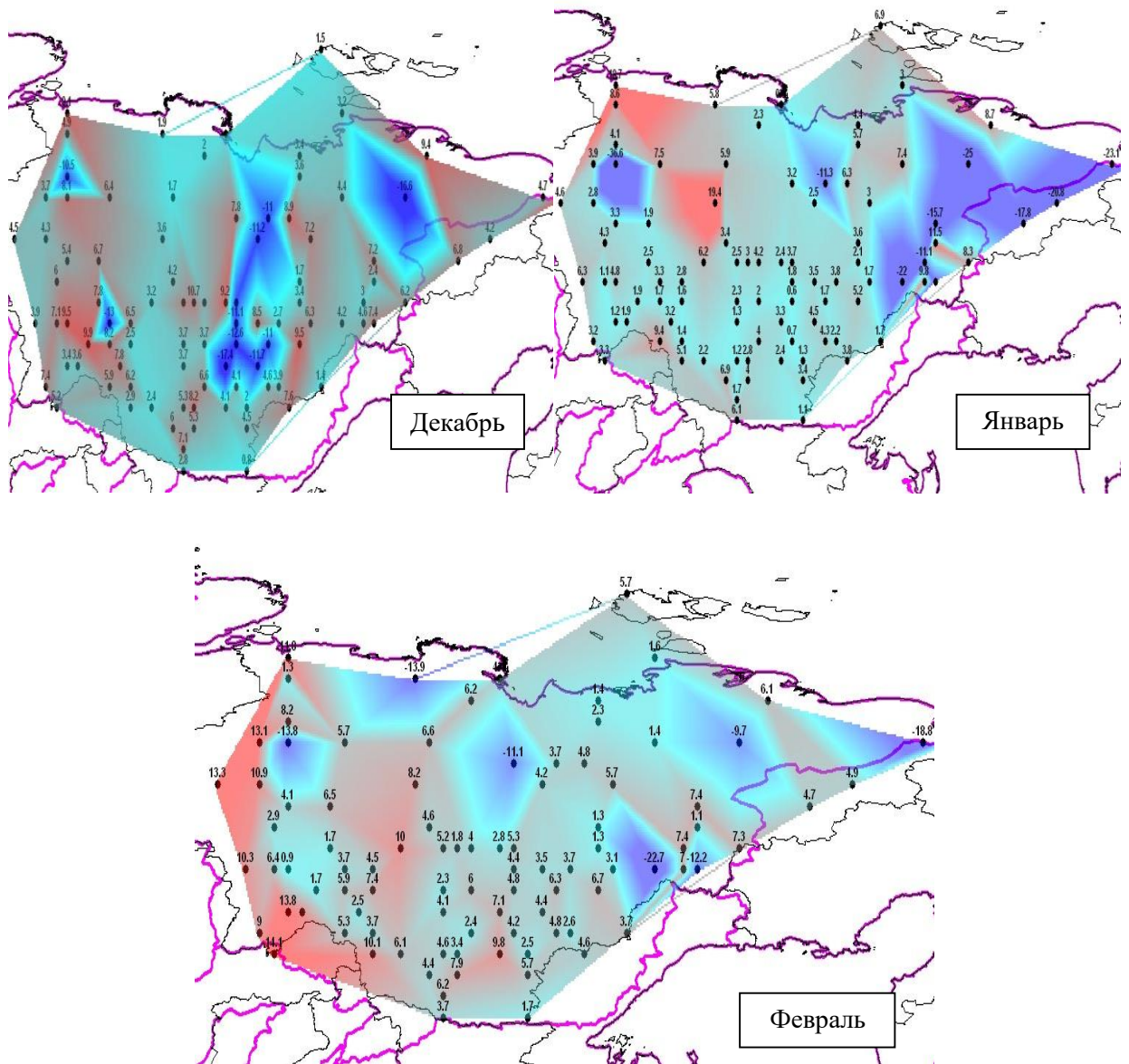


Рисунок 2.7 – Пространственные модели отклонений от нестационарности $\Delta_{стун}$ в % для среднемесячных атмосферных осадков за период с 1966 по 2013 гг. по территории Республики Саха (Якутия) (пределы изменения Δ ступ по цветам: синий – -10,0 и выше; зеленый – 0–9,9; красный – 10,0 и выше)

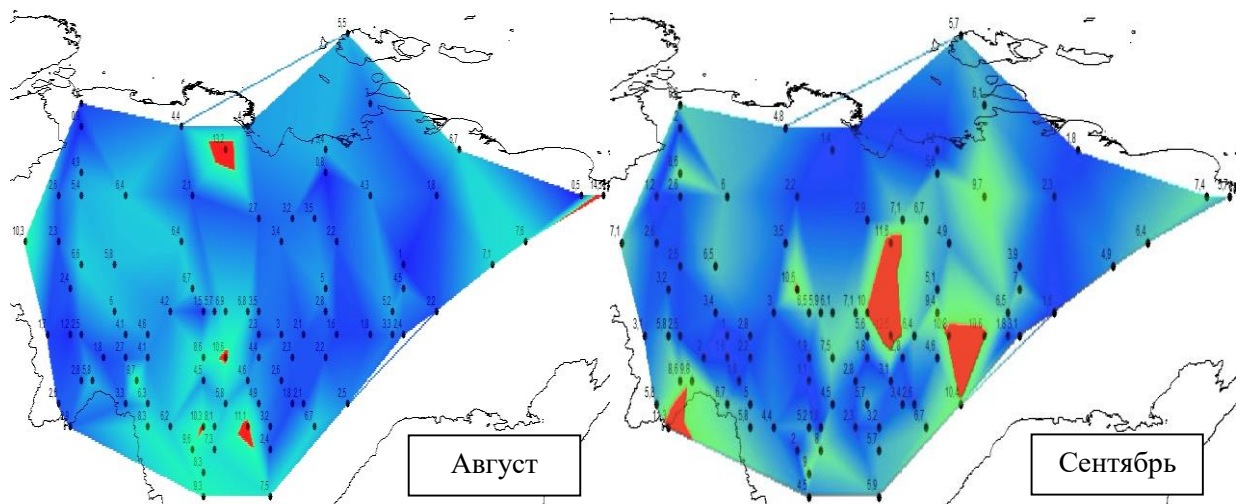


Рисунок 2.8 – Пространственные модели отклонений от нестационарности $\Delta_{стун}$ в % для среднемесячных атмосферных осадков за период с 1966 по 2013 гг.

по территории Республики Саха (Якутия)

(пределы изменения Δ ступ по цветам: синий – 0–5,9; зеленый – 6,0–9,9;

красный >10,0)

Как следует из Рисунков 2.7–2.8, нестационарность наиболее сильно проявляет себя в зимние месяцы, а именно с декабря по февраль. Если в декабре нестационарность представлена в виде отдельных очагов в центре, северо-востоке республики и небольшого на западе, то в январе она занимает северо-восток и чуть меньшую площадь на северо-западе. К февралю нестационарность смещается к западу республики. К концу зимы (март) нестационарность исчезает, и территория Якутии становится практически полностью стационарной, за исключением двух маленьких очагов на севере и западе республики. В начале переходного сезона (апрель) происходит усиление нестационарности на севере республики. Весной (май) снова происходит ослабление нестационарности, территория республики становится почти полностью стационарна, за исключением небольшого очага нестационарности на западе. В начале летнего сезона (июнь) происходит второй всплеск нестационарности, но более слабый по сравнению с зимним, который имеет очаговый характер и проявляет себя практически на всей территории республики за исключением ее северной оконечности и центра. В оставшиеся летние месяцы (июль и август) территория республики снова становится стационарна за исключением точечного распространения нестационарности уже в разных частях республики. Осенью (сентябрь) происходит третий всплеск нестационарности, который проявляет себя наиболее сильно в восточной и центральной частях и несколько меньше на западе Якутии. В начале зимнего периода (октябрь, ноябрь) нестационарность снова ослабевает и проявляет себя в виде небольших очагов, постепенно смещаясь с западной части на север и центральную части республики, чтобы вновь обрести силу в декабре.

Основной вывод заключается в том, что нестационарность в рядах атмосферных осадков в исследуемом регионе проявляется на разных станциях в разные месяцы: в половине случаев количество осадков увеличиваются, а в другой половине – уменьшаются.

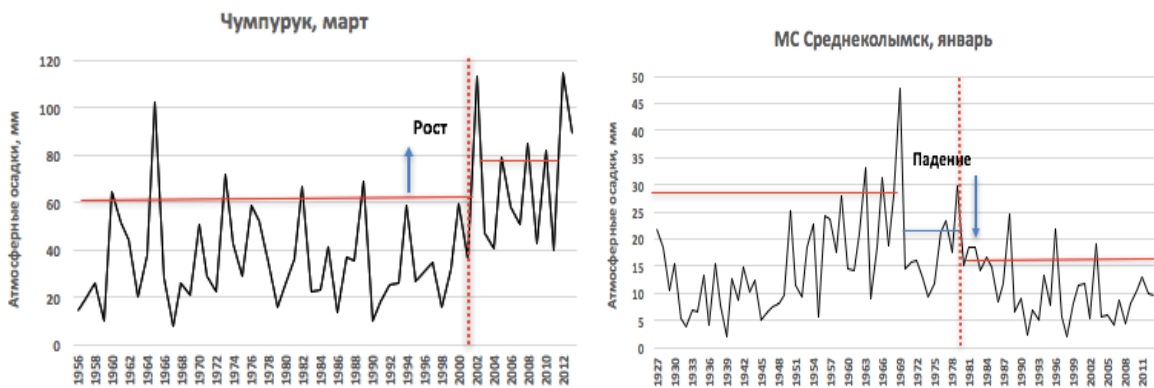
Также было проведено сравнение с известной методикой оценки стационарности средних и дисперсий за две последовательных части временного ряда. Все полученные результаты оценки стационарности по статистическим критериям Фишера и Стьюдента, а также статистической значимости коэффициентов корреляции линейного тренда приведены в Таблице 2.19.

Таблица 2.19 – Число нестационарных рядов наблюдений за среднемесячными атмосферными осадками за период с 1966 по 2013 гг. на метеостанциях Республики Саха (Якутия)

Показатель	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
n_{St}	31	46	22	27	28	21	28	41	53	24	27	48
n_R	18	27	5	10	12	13	13	10	9	13	6	23
$n_H (>10\%)$	14	17	3	3	4	8	4	6	8	5	2	12
$n_{рост}$	3	10	2	–	4	4	3	6	8	3	2	1
$n_{пад}$	11	7	1	3	0	4	1	–	–	2	–	11

По результатам Таблицы 2.19 можно сделать вывод, что из трех методов оценки стационарности средних значений (критерий Стьюдента, линейный тренд и модель ступенчатых изменений) наибольшее число нестационарных рядов выявлено по критерию Стьюдента, а наименьшее – по эффективной модели ступенчатых изменений. Вместе с тем, период с наибольшей нестационарностью приходится у всех трех методов на декабрь и февраль, хотя максимум может варьироваться в течение года.

Далее представим в графической форме примеры нестационарных рядов осадков.



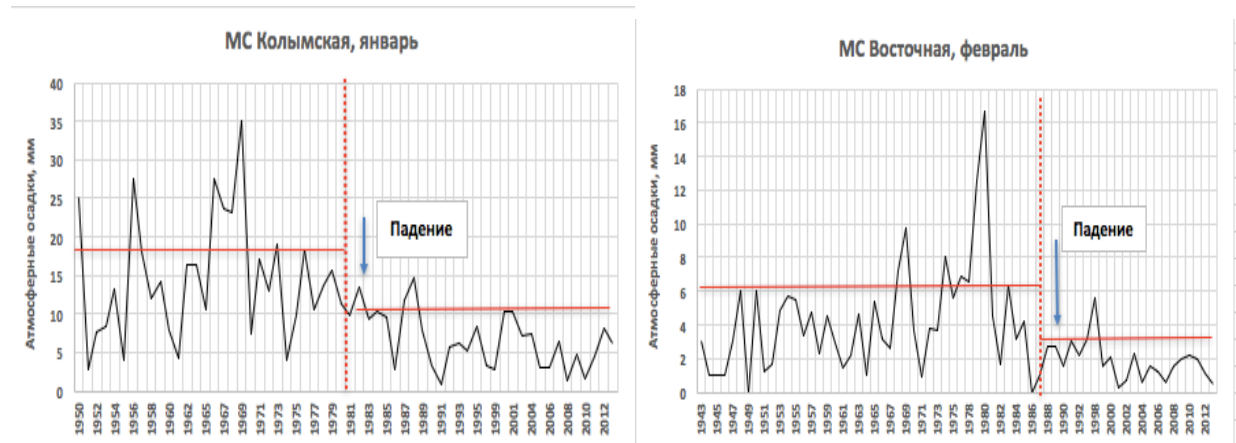


Рисунок 2.9 – Примеры нестационарных рядов на метеостанциях Якутии

Таким образом, по итогам выполненной работы получены следующие основные выводы:

- многолетние ряды среднемесячных атмосферных осадков на территории Якутии не являются полностью стационарными;
- из двух рассмотренных нестационарных моделей модель ступенчатых изменений является более эффективной (почти в четыре раза) для описания межгодовых изменений атмосферных осадков по сравнению с широко применяемой в настоящее время моделью линейного тренда и ступенчатый рост/ ступенчатое снижение атмосферных осадков относится в 1990-м гг.;
- во внутригодовом распределении нестационарности наибольшие значения приходятся на месяцы холодного периода года (декабрь-февраль);
- при сравнении с методами оценки стационарности (критерий Стьюдента и статистическая значимость линейного тренда) получены аналогичные выводы о динамике нестационарности внутри года, что и по модели ступенчатых изменений.

В целом можно сделать заключение, что современные изменения атмосферных осадков в Якутии более однородны по сравнению с температурой воздуха в пространстве и времени, но в целом они меняются до противоположных по знаку тенденций в разные сезоны года. В холодный сезон года, особенно за период с декабря по март, наблюдается тенденция к падению осадков, наиболее выраженно себя проявляющая на северо-востоке республики. В теплый период года (с мая по сентябрь) наблюдается противоположная тенденция – к их росту [63].

2.4 Оценка устойчивости полученных изменений

Эмпирико-статистические модели имеют одну интересную особенность, которая заключается в том, что их параметры не остаются постоянными во времени, и, следовательно, требуется проводить пересчет при появлении новых данных или информации. В данном диссертационном исследовании моделирование временных рядов температур воздуха и

атмосферных осадков было проведено по 2013 г. включительно, поскольку сбор данных был запланирован и произведен на первом году обучения в аспирантуре (2013–2014-й академический год). Для проверки устойчивости моделей и оценки их эволюции было решено дополнить анализ последними годами наблюдений по 2016 г. включительно, которые были получены с сайта Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации.

Было выбрано пять реперных метеостанций, имеющих наиболее продолжительный период наблюдений, которые находятся в разных частях республики (Верхоянск – север, Олекминск – юг, Усть-Мая – восток, Вилюйск – запад и метеостанция Якутск – в центре). Позже эти станции использовались как реперные станции для проведения оценки будущего климата Якутии в третьей главе диссертации.

По выбранным рядам наблюдений за среднемесячной температурой воздуха была проведена процедура статистического моделирования за весь период наблюдений до 2016 г. включительно. При этом процедура восстановления пропусков и приведения к многолетнему периоду не применялась, чтобы не внести дополнительные погрешности в результаты моделирования, которые представлены в нижеследующей Таблице 2.20.

Таблица 2.20 – Характеристики моделей временных рядов месячной температуры воздуха на метеостанциях Республики Саха (Якутия), дополненные последними годами наблюдений

Код ВМО	Посл, год	$\Delta_{тр}\%$	$\Delta_{стун}\%$	$F_{тр}$	$F_{стун}$	$T_{стун}$	$T_{нач}$	$T_{кон}$	N	$R_{тр}$
январь										
24266	2013	8,3	8,9	1,19	1,21	1991	1960	2013	54	0,4
	2016	9,3	9,4	1,21	1,22	1991	1960	2016	57	0,42
24641	2013	4,4	7,2	1,09	1,16	1991	1960	2013	54	0,29
	2016	4,3	6,7	1,09	1,15	1991	1960	2016	57	0,29
24944	2013	0,2	0,8	1	1,02	1981	1960	2013	54	0,06
	2016	0,2	0,8	1	1,02	1981	1960	2016	57	0,07
24959	2013	7,1	10,7	1,16	1,25	1991	1960	2013	54	0,37
	2016	8,3	11,4	1,19	1,27	1991	1960	2016	57	0,4
24966	2013	4,3	23,3	1,09	1,7	1974	1960	2013	54	0,29
	2016	2,6	20,8	1,05	1,59	1974	1960	2016	57	0,23
апрель										
24266	2013	5,6	5,7	1,12	1,12	1972	1960	2013	54	0,33
	2016	8,3	8,1	1,19	1,18	2005	1960	2016	57	0,4
24641	2013	12,4	12,1	1,3	1,29	1997	1960	2013	54	0,48
	2016	15,1	14,4	1,39	1,36	1997	1960	2016	57	0,53
24944	2013	0,2	2,4	1	1,05	1997	1960	2013	54	0,06

Продолжение Таблицы 2.20

	2016	0,6	3,1	1,01	1,07	1997	1960	2016	57	0,11
24959	2013	13,6	12,2	1,34	1,3	1974	1960	2013	54	0,5
	2016	16,9	13,1	1,45	1,32	2002	1960	2016	57	0,56
24966	2013	0,9	13,1	1,02	1,32	1971	1960	2013	54	-0,13
	2016	0,1	8,6	1	1,2	2006	1960	2016	57	0,05
июль										
24266	2013	7,9	9,1	1,18	1,21	1991	1960	2013	54	0,39
	2016	5,9	7,8	1,13	1,18	1991	1960	2016	57	0,34
24641	2013	2,7	4,5	1,06	1,1	1991	1960	2013	54	0,23
	2016	3,4	5	1,07	1,11	1991	1960	2016	57	0,26
24944	2013	0,4	2,2	1,01	1,05	1986	1960	2013	54	0,09
	2016	0,2	1,9	1	1,04	1980	1960	2016	57	0,06
24959	2013	6,6	9,7	1,15	1,23	1997	1960	2013	54	0,36
	2016	5,6	8,6	1,12	1,2	1997	1960	2016	57	0,33
24966	2013	0,2	4,8	1	1,1	2001	1960	2013	54	0,06
	2016	0,6	5,8	1,01	1,13	2001	1960	2016	57	0,11
сентябрь										
24266	2013	0,3	1,2	1,01	1,02	2003	1960	2013	54	0,08
	2015	0,6	1,6	1,01	1,03	2003	1960	2015	56	0,11
24641	2013	2,7	5,8	1,06	1,13	2003	1960	2013	54	0,23
	2015	2,5	5,2	1,05	1,11	2003	1960	2015	56	0,22
24944	2013	0	0,8	1	1,02	1970	1960	2013	54	-0,01
	2015	0,1	0,8	1	1,02	1996	1960	2015	56	-0,03
24959	2013	1,1	4,8	1,02	1,1	2002	1960	2013	54	0,15
	2015	1	4,3	1,02	1,09	2002	1960	2015	56	0,14
24966	2013	0	4,7	1	1,1	1971	1960	2013	54	0,01
	2015	0,2	5,6	1	1,12	2003	1960	2015	56	0,06

Анализ результатов, приведенных в Таблице 2.20, позволяет сделать следующие выводы:

- число нестационарных моделей в оба периода является наибольшим в переходный к теплоте период года (апрель);
- число эффективных нестационарных моделей не увеличилось при привлечении последних лет наблюдений;
- годы ступенчатого роста температур остаются практически неизменными, заметные изменения наблюдались в наибольшей мере в переходный сезон (апрель – наибольшее число изменений, на станциях 24944 (Олекминск) и 24966 (Усть-Мая) – по два выявленных случая);
- в целом моделирование с привлечением последних лет наблюдений, подтверждает полученные ранее закономерности.

3. Оценка будущих изменений климатических характеристик и их возможного воздействия на основные отрасли экономики Республики Саха (Якутия)

3.1 Стратегия оценки возможных будущих изменений климатических характеристик на основе сценариев и моделей

Одной из наиболее важных проблем, стоящих на повестке дня для современного сообщества является проблема глобального изменения климата, происходящего за счет антропогенной деятельности человека. Исследование влияния деятельности человека на климат в настоящее время осуществляется на основе физико-математических моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) с включением в них биологических, химических и других блоков. В 2005–2006-х гг. рабочая группа по совместным моделям между атмосферой и океаном (Working Group on Coupled Modelling – WCGM) начала собирать результаты климатического моделирования ведущих научных центров по всему миру. Собранные в виде архивов результаты моделирования прошлого, настоящего и будущего климата сформировали третью фазу проекта по сравнению взаимосвязанных моделей (Coupled Model Intercomparison Project – CMIP3). Эта коллекция результатов моделирования получила название «Мультимодельные наборы данных проекта CMIP3 Всемирной программы исследований климата» или «WCRP CMIP3 multi-model dataset». Она представляют собой всеобъемлющий архив большого набора данных по климату двадцатого и двадцать первого веков и других экспериментов.

В сентябре 2008 г. на встрече с участием 20 ведущих международных коллективов по моделированию климата в рамках рабочей группы по моделям взаимодействия между атмосферой и океаном была достигнута договоренность о проведении следующего этапа работ с использованием нового набора скоординированных экспериментов. Эти эксперименты сформировали пятую фазу международного проекта по сравнению моделей (CMIP5).

В проекте CMIP5 представлены новые сценарии RCP (Representative Concentration Pathway), связанные со стабилизацией общего антропогенного воздействия в 2100 г. также на разных уровнях: 2.6, 4.5, и 8.5 Вт/м² и вместо концентрации CO₂ в ppm в этих сценариях дан общий эффект воздействия в Вт/м². Изменения климата в проекте CMIP5 рассматриваются для начала (2011–2030-е гг.), для середины (2041–2060-е гг.) и конца (2080–2099-е гг.) XXI века, осредненные за 20 лет по отношению к базовому климатическому периоду 1980–1999-е гг. Число моделей, которые использовались в CMIP5 было более 50 [64; 65]. В список моделей, выбранных нами для моделирования будущих климатических изменений в Республике Саха (Якутия), по принципу доступности в сети Интернет и наличия данных по основным сценариям RCP 2.6, 4.5 и 8.5, входят следующие:

1) BCC – модель пекинского климатического центра, Китай (Beijing Climate Centre, China, BCC-CM1 Model);

2) CNRM – модель центра национальных метеорологических исследований, Франция (Meteo-France, Centre National de Recherches Meteorologiques, CM3 Model, CERFACS);

3) HadGEM2 – модель HadCM3 Хэдли центра прогноза климата, Великобритания (Hadley Centre for Climate Prediction, Met Office, UK, HadCM3 Model);

4) INM – модель института вычислительной математики РАН, Россия (Institute for Numerical Mathematics (INM), Russia, INM-CM4);

5) IPSL – CM5A-MR – модель CM4 V1 Института Лапласа, Франция (Institute Pierre-Simon Laplace IPSL/LMD/LSCE, France);

6) MPI – модель института Макса Планка, Германия (Max Planck Institute for Meteorology, Germany, ECHAM5 / MPI OM).

Алгоритм оценки возможных будущих изменений климатических характеристик на основе сценариев и моделей для Якутии состоял из следующих этапов, которые будут детально рассмотрены в соответствующих разделах главы:

- поиск и получение данных по выбранным климатическим моделям на портале <http://pcmdi9.llnl.gov/esgf-web-fe/>;
- проведение обработки полученных файлов моделирования с помощью программы «Convert» для выбора информации из файла результатов климатического моделирования и преобразования ее во временной ряд формата «txt» для последующих расчетов и анализа;
- сопоставление рядов, смоделированных данных и данных наблюдений выбранных климатических характеристик (температура воздуха, атмосферные осадки) за совместный период наблюдений и выбор наиболее эффективной модели для оценки будущих изменений климата до 2100 г.;
- проведение оценки возможных будущих изменений климата рассматриваемого региона с помощью выбранных климатических моделей на период до 2100 г. на основе таких метеопараметров как средние за 30 лет температура воздуха и атмосферные осадки.

3.2 Выбор эффективной климатической модели для температуры воздуха

Выбор наиболее эффективной модели был основан на сопоставлении данных климатического моделирования и данных наблюдений за совместный период. Для этой цели были использованы результаты эксперимента по моделированию современного климата за период с 1850 по 2005 гг., а в качестве пространственной точки – ближайший к рассматриваемой

метеостанции узел сетки с размером ячейки $1^0 \times 1^0$, полученной пространственной интерполяцией данных моделирования.

Для сравнения с данными моделирования были выбраны пять метеостанций, находящихся в разных частях территории Республики Саха (Якутия): метеостанция Верхоянск (67.57 с.ш., 133.40 в.д.), находящаяся на севере, метеостанция Якутск (62.02 с.ш., 129.72 в.д.) – в центре, метеостанция Олекминск (60.40 с.ш., 120.42 в.д.) – на юге, метеостанция Вилюйск – на западе (63.78 с.ш., 121.62 в.д.) и метеостанция Усть-Мая (60.38 с.ш., 134.45 в.д.) – на востоке республики (Рисунок 3.1). Кроме того, эти метеостанции имеют наиболее продолжительные ряды наблюдений с информацией по 2013 г. включительно, начиная с 1830 г. – Якутск, с 1869 г. – Верхоянск, с 1882 г. – Олекминск, с 1863 г. – Вилюйск и с 1893г. – Усть-Мая.



Рисунок 3.1 – Расположение метеостанций на территории Республики Саха (Якутия), выбранных для сравнения с данными моделирования

Выбранные метеостанции характеризуют климатические особенности разных частей территории республики и имеют высокие коэффициенты корреляции с рядами наблюдений на окружающих станциях и меньшие с рядами на станциях в других частях республики. Корреляционные матрицы парных коэффициентов корреляции между рядами на выбранных реперных метеостанциях за разные сезоны года приведены в Таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Корреляционные матрицы температуры характерных месяцев между выбранными метеостанциями на территории Республики Саха (Якутия)

Январь					
	Верхоянск	Вилюйск	Олекминск	Усть-Мая	Якутск
Верхоянск	1				
Вилюйск	0,56	1			
Олекминск	0,28	0,86	1		
Усть-Мая	0,50	0,32	0,19	1	

Продолжение Таблицы 3.1

Якутск	0,65	0,83	0,62	0,61	1
Апрель					
	Верхоянск	Вилуйск	Олекминск	Усть-Мая	Якутск
Верхоянск	1				
Вилуйск	0,77	1			
Олекминск	0,16	0,37	1		
Усть-Мая	0,31	0,18	0,15	1	
Якутск	0,75	0,87	0,32	0,10	1
Июль					
	Верхоянск	Вилуйск	Олекминск	Усть-Мая	Якутск
Верхоянск	1				
Вилуйск	0,62	1			
Олекминск	0,43	0,82	1		
Усть-Мая	0,55	0,32	0,36	1	
Якутск	0,69	0,82	0,72	0,55	1
Сентябрь					
	Верхоянск	Вилуйск	Олекминск	Усть-Мая	Якутск
Верхоянск	1				
Вилуйск	0,72	1			
Олекминск	0,63	0,86	1		
Усть-Мая	0,57	0,51	0,50	1	
Якутск	0,71	0,85	0,75	0,63	1

По результатам Таблицы 3.1 можно сделать вывод, что коэффициенты корреляции между станциями в разных частях республики в среднем не очень высокие и связанность зависит от сезона года. Наименьшая территориальная связанность имеет место весной со средним коэффициентом корреляции $R_{\text{ср}}=0,40$, наибольшая в сентябре ($R_{\text{ср}}=0,67$), затем летом ($R_{\text{ср}}=0,59$) и зимой ($R_{\text{ср}}=0,54$). Наиболее высокая связанность наблюдается между метеостанциями Вилуйск, Олекминск и Якутск с $R=0,7-0,8$ во все сезоны года кроме весны. Менее всего связана с остальными восточная часть территории (Усть-Мая), для которой коэффициенты корреляции могут быть всего $0,1-0,15$ в весенний сезон. Север же территории (Верхоянск) имеет наибольшую связанность с соседними районами весной ($R=0,75-0,77$).

Для каждой выбранной метеостанции рассчитывались коэффициенты корреляции между среднемесячными температурами по данным наблюдений и климатического моделирования за совместный период. Пример рассчитанных коэффициентов парной корреляции (R) для метеостанции Верхоянск между данными наблюдений и моделирования дан в Табл.3.2 для всего периода наблюдений, периода рекомендованного ВМО для расчета климатических норм (1961–1990-е гг.) и последнего 30-летнего периода (1976–2005-е гг.). В Таблице 3.2 приведены только те месяцы, за которые коэффициенты корреляции были больше 0.5.

Таблица 3.2 – Коэффициенты корреляции между наблюдаемой температурой и результатами моделирования по историческому эксперименту за совместный период по метеостанции Верхоянск, Северная Якутия (для месяцев с $R > 0.5$)

Период, годы	Модель					
	BCC	CNRM	Hadley	INM	IPSL	MPI
Июль						
весь	0,12	-0,1	0,02	0,12	-0,02	0,19
1961–1990	0,04	-0,13	0,1	0,24	-0,12	-0,24
1976–2005	0,51	-0,36	0,1	-0,03	0,02	0,21
Август						
весь	0,13	0,37	-0,1	0,1	0,15	0,13
1961–1990	0,29	0,33	0,1	-0,02	0,26	0,22
1976–2005	-0,02	0,63	-0,24	0,1	0,16	0,52

Из результатов Таблицы 3.2 следует, что коэффициенты корреляции между наблюдаемыми и модельными температурами очень низкие и имеют место всего 3 случая, когда они были больше 0,5: для июля и августа и за последний период наблюдений: $R=0,51$ (BCC, июль), $R=0,63$ (CNRM, август) и $R=0,52$ (MPI, август). Для остальных четырех метеостанций получено всего три коэффициента корреляции чуть больших 0,5 ($R=0,51–0,53$) в разные месяцы (сентябрь, декабрь, июль), как правило, за последний период наблюдений и по разным моделям: CNRM, MPI и BCC. Для метеостанции Олекминск во всех случаях коэффициент корреляции был меньше 0,5.

Пример временного графика среднемесячной температуры августа по данным наблюдений и моделирования для метеостанции Верхоянск показан на Рисунке 3.2 при $R=0,63$ за весь период наблюдений.



Рисунок 3.2 – Хронологические графики наблюдаемой (сплошная линия) и смоделированной (пунктирная линия) температуры августа на метеостанции Верхоянск (для модели CNRM Центра национальных метеорологических исследований Франции)

Полученные низкие значения коэффициентов корреляции между смоделированными и фактическими рядами наблюдений вполне могут быть обусловлены тем, что математические модели климата не в состоянии надежно моделировать температуру воздуха в каждой отдельной точке поверхности Земли, где на нее влияют различные азональные факторы. Поэтому дополнительно было проведено сравнение данных моделирования и наблюдений для всей территории Республики Саха (Якутия). При этом данные моделирования осреднялись по 12 узлам сетки, а данные наблюдений – по 96 метеостанциям на территории республики. Периодом для сравнения был выбран период рекомендованный ВМО (1961–1990 гг.), а в качестве исследуемых месяцев – характерные месяцы года: январь и июль. Коэффициенты корреляции между средними территориальными температурами по данным наблюдения и моделирования приведены в Таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Коэффициенты корреляции между наблюдаемой температурой на территории Республики Саха (Якутия) и расчетной по моделям за совместный период с 1961 по 1990-е гг. в рамках исторического эксперимента

Исторический эксперимент	Модель					
	BCC	CNRM	Had	INM	IPSL	MPI
ВМО	Январь					
	0,10	-0,10	-0,30	0,10	-0,31	-0,14
ВМО	Июль					
	0,27	-0,20	0,10	0,23	-0,04	0,10

Низкие значения вычисленных коэффициентов корреляции из Таблицы 3.3 подтверждают вывод о том, что математические модели климата на данный момент времени не в состоянии достаточно надежно воспроизводить межгодовую изменчивость температуры воздуха как для отдельных точек пространства, так и осредненную по территории. Поэтому модели климата можно применять в лучшем случае только для осредненных за период времени данных, например, для климатических норм за 20–30-летние периоды. При этих условиях для выбора наиболее эффективной модели климата для территории Республики Саха (Якутия) было проведено сравнение климатических норм, вычисленных за последовательные 30-летние периоды по результатам моделирования и по данным наблюдений. Пример расчета климатических норм и разностей между наблюдаемыми и смоделированными нормами (ΔT , °C) за разные интервалы времени дан в Таблице 3.4 для метеостанции Якутск, где ярким цветом выделены отклонения смоделированных температур от наблюдаемых в пределах $\pm 1^\circ\text{C}$, а в первой строке приведены нормы наблюдаемых температур (“наблюд.”).

Таблица 3.4 – Разности между климатическими нормами, полученными по данным моделирования и наблюдений (ΔT^0C) для метеостанции Якутск

Модель	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1916–1945 гг.												
Наблюд.	-42,4	-35,9	-22,3	-7,7	5,5	15,6	19,0	14,9	6,5	-7,3	-27,1	-39,2
BCC	7,2	6,5	4,6	0,0	-3,7	-5,7	-5,7	-6,4	-6,5	-5,0	-1,5	4,0
CNRM	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
HadGEM2	1,2	2,2	2,3	0,9	2,1	2,8	1,5	0,5	0,6	1,9	2,9	2,1
INM	8,3	3,9	-3,5	-5,3	0,4	1,5	-0,3	-2,4	-4,1	-2,9	2,4	6,8
IPSL	12,3	11,1	7,3	2,4	0,8	1,4	1,2	1,7	0,3	-0,4	4,8	10,3
MPI	10,1	8,9	3,7	0,6	-0,7	-1,9	-2,6	-2,8	-1,6	0,2	4,1	8,8
1946–1975 гг.												
Наблюд.	-42,0	-36,8	-22,7	-7,0	6,1	15,4	18,9	15,2	6,1	-8,0	-29,4	-40,2
BCC	8,0	7,4	4,8	0,2	-3,6	-5,2	-4,9	-6,0	-5,4	-3,5	1,8	6,4
CNRM	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
HadGEM2	0,9	1,6	3,0	1,2	2,6	3,2	1,1	0,6	0,3	1,9	6,0	3,1
INM	7,8	5,2	-2,6	-4,3	0,5	2,2	-0,1	-2,5	-2,7	-1,6	5,3	8,9
IPSL	12,1	11,4	7,7	2,0	1,1	1,9	1,3	1,3	0,3	-0,1	6,9	11,3
MPI	10,8	9,0	4,1	0,8	-1,0	-1,4	-2,8	-2,5	-0,5	-0,1	7,3	9,5
1961–1990 гг.												
Наблюд.	-40,9	-35,9	-21,6	-6,1	6,7	15,4	18,7	15,0	5,7	-8,6	-29,2	-38,9
BCC	6,9	7,0	4,4	-0,5	-4,5	-5,0	-5,0	-5,3	-5,0	2,7	3,1	4,9
CNRM	2,2	8,9	-0,5	-2,8	-2,2	0,3	1,7	1,6	1,2	0,8	3,4	3,5
HadGEM2	0,3	1,3	1,9	0,6	2,0	3,3	0,8	0,7	0,5	2,3	5,3	1,8
INM	7,4	4,0	-3,2	-5,2	0,3	2,0	0,4	-2,0	-2,5	-0,6	5,9	7,4
IPSL	11,2	11,2	7,6	1,3	0,7	1,8	1,4	1,6	0,7	0,4	7,3	10,2
MPI	10,0	8,7	3,9	-0,1	-1,6	-1,5	-2,4	-2,1	0,3	1,2	7,8	9,2
1976–2005 гг.												
Наблюд.	-39,3	-34,1	-21,0	-5,1	7,2	15,9	19,2	15,1	5,9	-8,5	-27,7	-37,9
BCC	6,1	5,7	3,6	-1,8	-4,8	-5,0	-5,7	-5,5	-5,1	-3,1	2,6	4,6
CNRM	1,4	8,7	-0,8	-3,3	-2,7	-0,1	1,4	1,7	1,0	1,3	2,5	3,9
HadGEM2	-0,1	1,3	2,5	0,1	2,1	3,5	0,9	1,0	1,6	2,9	4,6	1,6
INM	6,1	2,0	-3,3	-5,8	0,5	1,6	-0,2	-1,7	-2,4	-0,8	4,7	6,4
IPSL	10,3	9,7	7,0	0,9	0,6	1,5	1,4	2,5	1,3	1,6	6,6	10,0
MPI	8,9	7,9	4,1	-0,4	-1,4	-1,6	-1,9	-2,0	0,0	0,7	6,8	8,9
За весь период наблюдений												
Наблюд.	-42,0	-35,6	-21,9	-6,8	6,1	15,5	18,9	14,9	6,2	-8,1	-28,2	-39,4
BCC	7,2	6,5	4,0	-0,5	-4,0	-5,4	-5,6	-6,0	-5,8	-4,0	1,0	5,0
CNRM	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
HadGEM2	1,2	1,0	2,1	0,8	2,2	3,1	1,2	0,8	0,7	2,1	4,3	2,3
INM	7,7	3,7	-3,4	-4,9	0,6	2,0	-0,1	-2,1	-3,2	-1,7	4,2	7,6
IPSL	12,1	10,4	7,1	1,9	1,1	1,6	1,3	1,7	0,3	0,1	5,8	10,6
MPI	10,2	8,2	3,6	0,3	-1,1	-1,7	-2,4	-2,2	-1,0	-0,1	6,0	9,1

Результаты Таблицы 3.4 свидетельствуют о том, что отличие норм может составлять до 10–12°C, причем такие большие отклонения наблюдаются в зимние месяцы и являются положительными, то есть модельные данные дают более высокие значения зимних температур, чем наблюдается в действительности. В теплые же месяцы года отклонения не превышают 5–6°C и, как правило, отрицательны, то есть нормы температур, полученные по данным моделирования, являются заниженными. Аналогичная ситуация с систематическим завышением зимних температур и занижением летних наблюдается и на остальных метеостанциях Якутии. Это обстоятельство связано, вероятно с тем, что модели климата недостаточно эффективно учитывают континентальность климата и дают заниженные значения амплитуды внутригодового хода для долготы Якутии.

Графическое представление отклонений норм смоделированной температуры по отношению к фактически наблюдаемой для всех 5 выбранных метеостанций приведено на Рисунках 3.3-3.7 за месяцы основных сезонов года и за разные периоды осреднения.

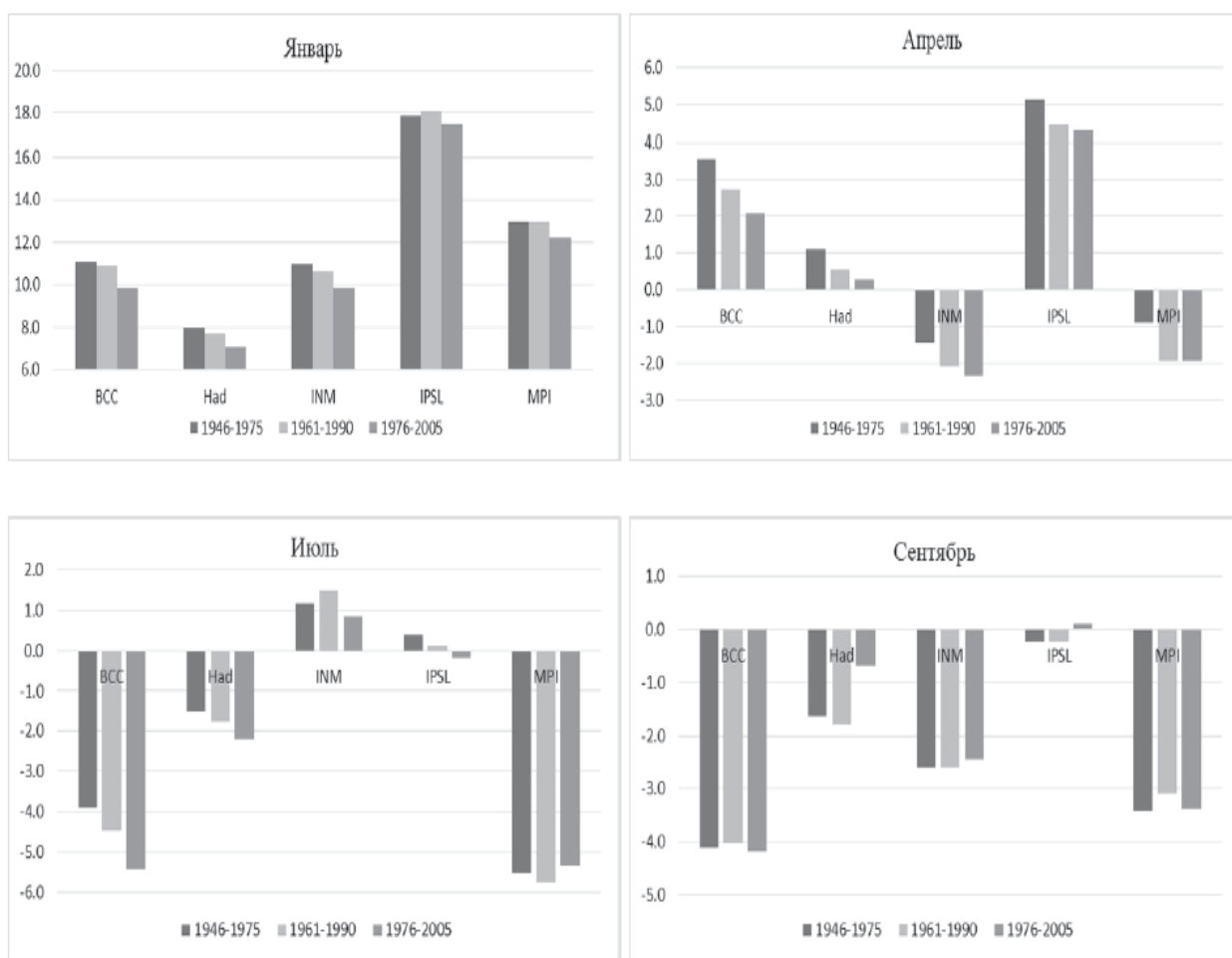


Рисунок 3.3 – Отклонения норм расчетной температуры по моделям от фактически наблюдаемой на метеостанции Верхоянск за совместный период (исторический эксперимент)

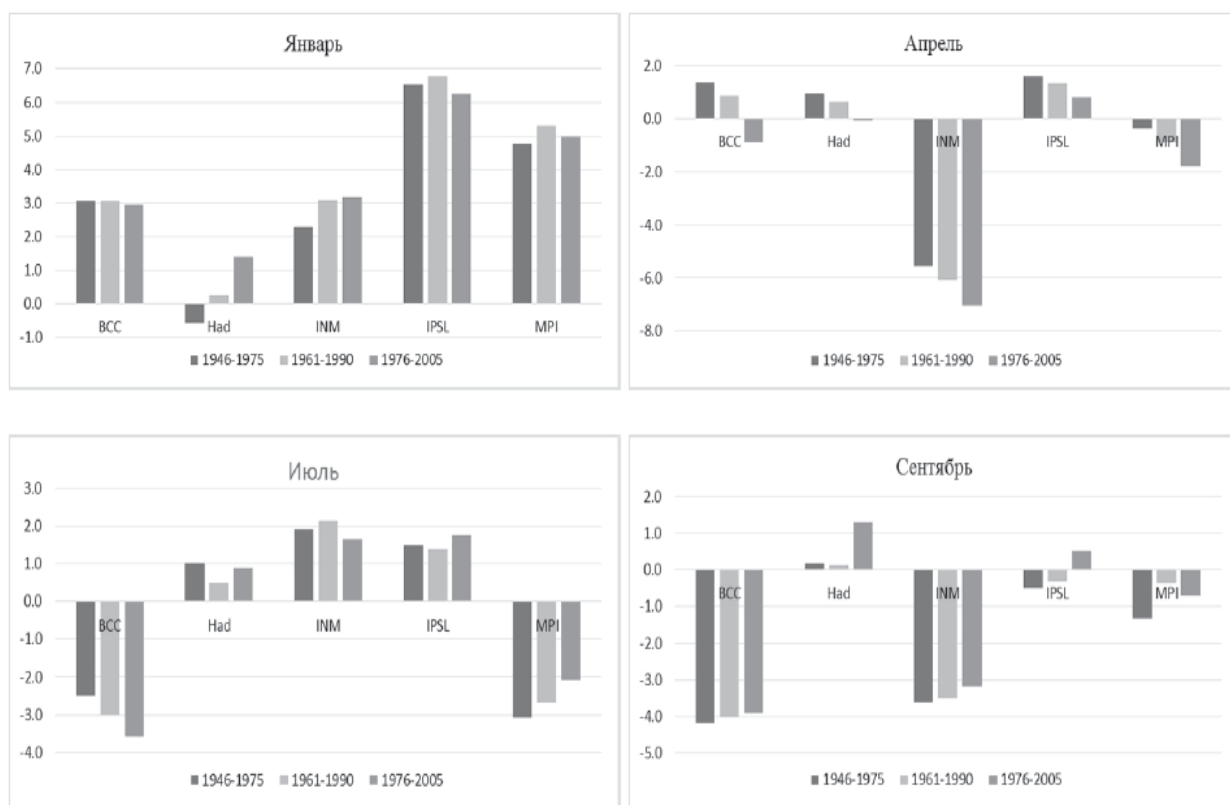


Рисунок 3.4 – Отклонения норм расчетной температуры по моделям от фактически наблюдаемой на метеостанции Вилуйск за совместный период (исторический эксперимент)

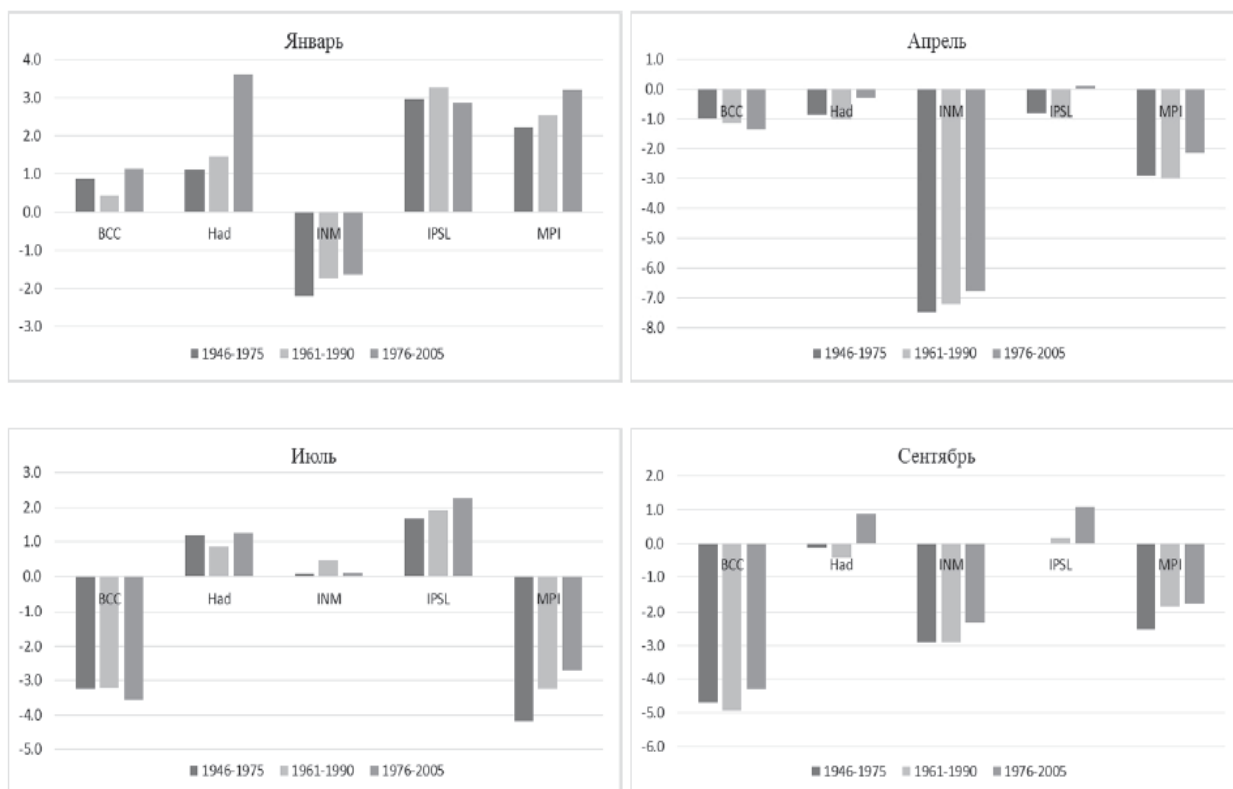


Рисунок 3.5 – Отклонения норм расчетной температуры по моделям от фактически наблюдаемой на метеостанции Олекминск за совместный период (исторический эксперимент)

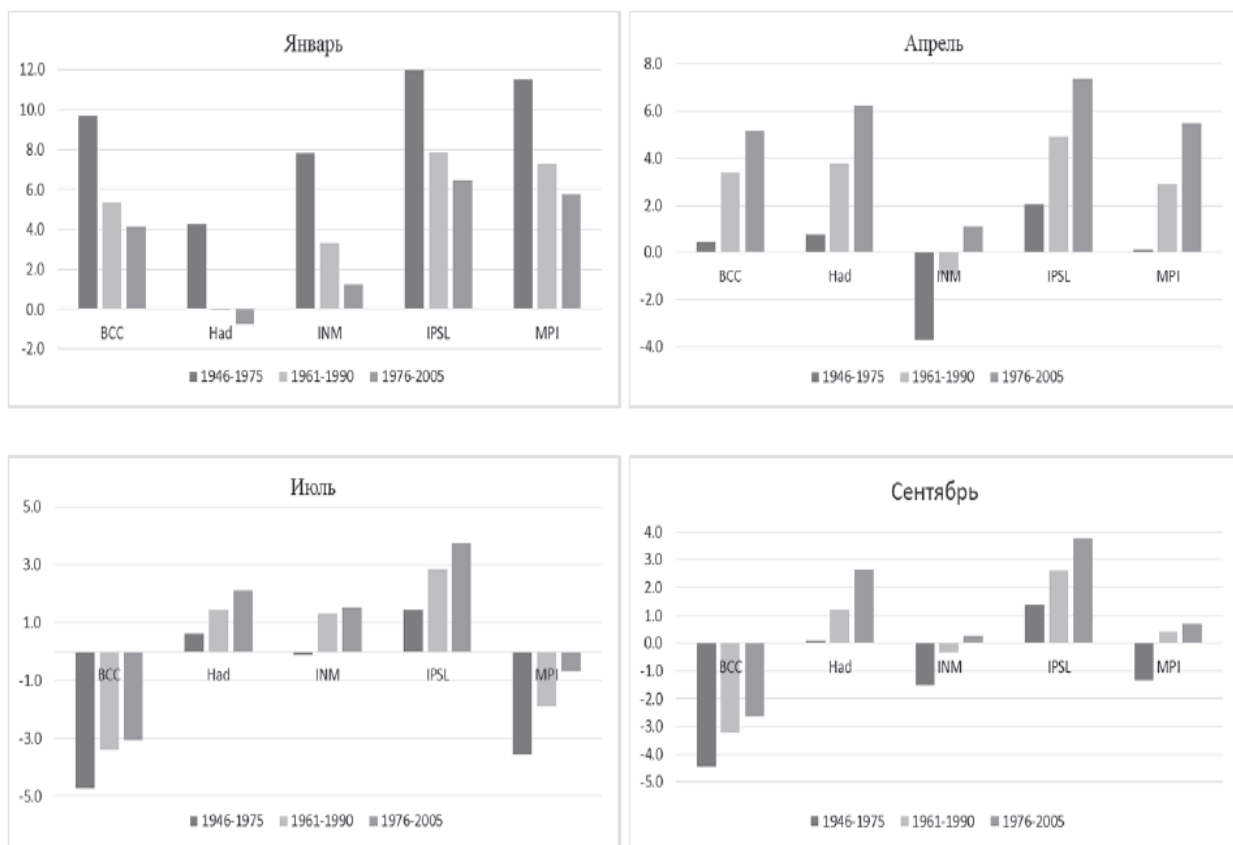


Рисунок 3.6 – Отклонения норм расчетной температуры по моделям от фактически наблюдаемой на метеостанции Усть-Майя за совместный период (исторический эксперимент)

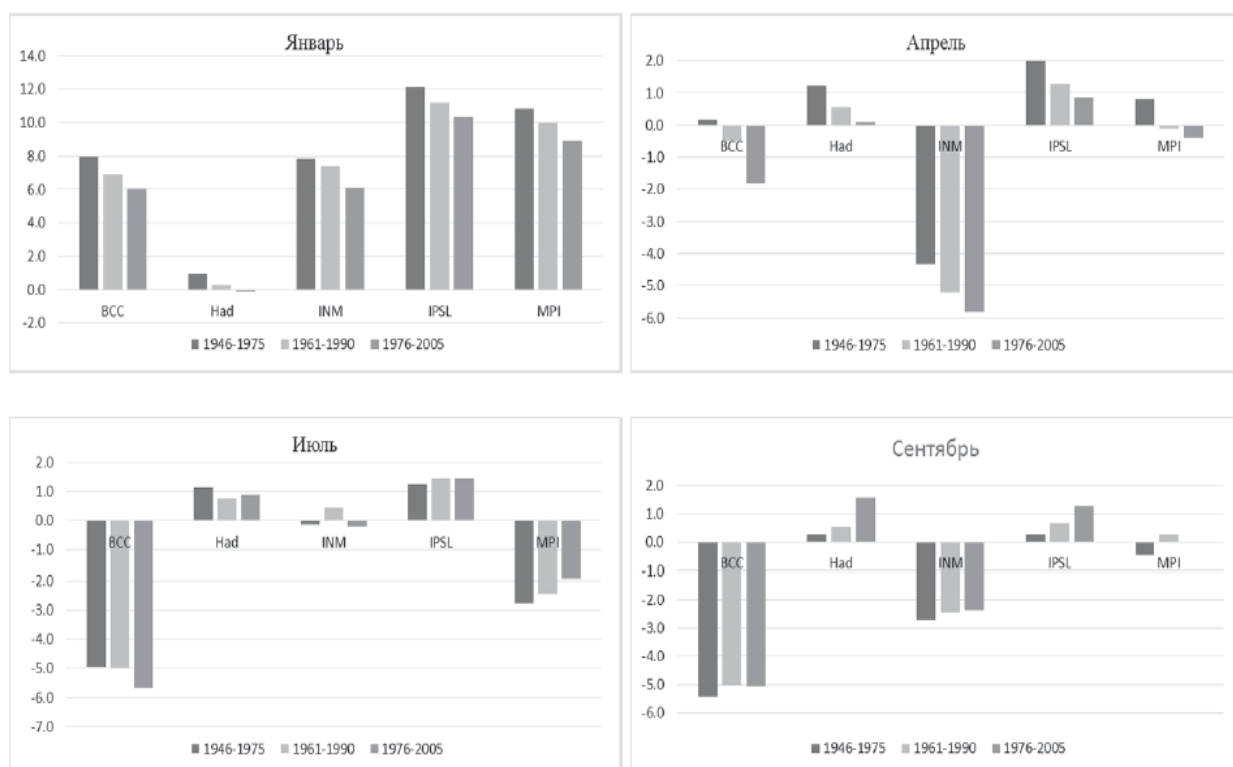


Рисунок 3.7 – Отклонения норм расчетной температуры по моделям от фактически наблюдаемой на метеостанции Якутск за совместный период (исторический эксперимент)

На основе выполненных расчетов и представленных на Рисунках 3.3–3.7 результатов можно оценить какая модель лучше всего рассчитывает нормы фактической температуры за разные интервалы времени. Причем помимо выборочных 30-летних периодов рассматривался также, и весь период наблюдений, и период ВМО. В результате по отдельным метеостанциям, месяцам и периодам времени получены следующие выводы:

1. Для метеостанции Верхоянск (Северная Якутия) в месяцы холодного периода года (январь, апрель) больше всего подходит HadGEM2 ($\Delta T = +7 - +8^{\circ}\text{C}$ в январе и $\Delta T = +0,3 - +0,6^{\circ}\text{C}$ в апреле), а в месяцы теплого периода года – модель IPSL ($\Delta T = -0,2 - +0,4^{\circ}\text{C}$ в июле и $\Delta T = -0,2 - +0,1^{\circ}\text{C}$ в сентябре).

2. Для метеостанции Вилуйск (Западная Якутия) модель HadGEM2 является наиболее эффективной уже в течение трех сезонов: зима, весна лето ($\Delta T = -1,3 - +1,4^{\circ}\text{C}$ в январе, $\Delta T = +0,2 - +0,9^{\circ}\text{C}$ в апреле и $\Delta T = +0,5 - +1,4^{\circ}\text{C}$ в июле), а осенью наилучшей является модель IPSL ($\Delta T = -0,3 - -0,5^{\circ}\text{C}$ в сентябре).

3. Для метеостанции Олекминск (Южная Якутия) в январе наиболее подходит модель BCC ($\Delta T = +0,4 - +1,2^{\circ}\text{C}$), в апреле наилучшими являются две модели: HadGEM2 ($\Delta T = -0,3 - -0,1^{\circ}\text{C}$) и IPSL ($\Delta T = -1,0 - +0,1^{\circ}\text{C}$), в июле – модель INM ($\Delta T = -0,1 - +0,5^{\circ}\text{C}$) и в сентябре – HadGEM2 - модель ($\Delta T = -0,4 - +0,9^{\circ}\text{C}$).

4. Для метеостанции Усть-Мая (Восточная Якутия) наиболее подходящей для января является модель HadGEM2 ($\Delta T = -0,7 - +4,3^{\circ}\text{C}$), а для остальных характерных месяцев года – модель INM ($\Delta T = -0,7 - +4,3^{\circ}\text{C}$ для апреля, $\Delta T = -0,1 - +1,5^{\circ}\text{C}$ для июля, $\Delta T = -1,5 - +0,3^{\circ}\text{C}$ для сентября).

5. Для метеостанции Якутск (Центральная Якутия): модель Hadley является наилучшей для января ($\Delta T = -0,1 - +1,2^{\circ}\text{C}$); для апреля - модели Hadley ($\Delta T = +0,1 - +1,2^{\circ}\text{C}$) и MPI ($\Delta T = -0,4 - +0,8^{\circ}\text{C}$), для июля – модель INM ($\Delta T = -0,3 - +0,4^{\circ}\text{C}$) и для сентября – модель MPI ($\Delta T = -1,6 - +0,2^{\circ}\text{C}$).

В общем можно сделать вывод, что в зависимости от станции или сезона наилучшими будут разные модели. Как правило, при применении наиболее эффективных моделей погрешности в нормах температур составляют менее 1°C для теплого периода года. Зимой погрешности в нормах могут составлять и по наилучшим моделям до $4-6^{\circ}\text{C}$, особенно для метеостанции Верхоянск, известной как «Полюс холода» со своими локальными особенностями, которые не могут учесть глобальные климатические модели. В целом наиболее эффективной для территории республики можно признать английскую модель HadGEM2 Хэдли Центра, которая показала себя наиболее эффективной в 50% случаев, затем идет российская климатическая модель Института вычислительной математики РАН (INM) – 25% случаев и французская модель Института Лапласа (IPSL) – 20% случаев. Для метеостанции Якутск в половине случаев была наиболее

эффективна также и немецкая модель Метеорологического института Макса Планка (MPI). Неплохие результаты показывает и модель Центра метеорологических национальных исследований Франции (CNRM), но данные моделирования по ней имеются только с 1950 г., что не дает возможности достаточно надежно оценить ее за многолетний период. Только в одном случае для метеостанции Олекминск и температуры января наилучшие результаты дала модель Пекинского климатического центра (BCC).

3.3 Полученные сценарные показатели климатических изменений для территории Республики Саха (Якутия) и оценка их эффективности и надежности для температуры воздуха

На основе выбранных климатических моделей была дана оценка будущего климата республики Саха (Якутия) на три последующих 30-летних периода времени до конца XXI в.: 2011–2040 гг., 2041–2070 гг. и 2071–2100 гг. Оценка производилась по трем основным сценариям: RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5 по отношению к норме 1976–2005 гг. и с учетом систематической погрешности модельных данных за этот интервал времени.

При применении наиболее эффективных моделей систематические погрешности в нормах температур составляли менее 1 °С для теплого периода года, зимой погрешности в нормах могли составлять и по наилучшим моделям до 4–6 °С; их значения были введены в виде поправочных коэффициентов при оценке будущих изменений температуры воздуха на территории Якутии.

Полученные температурные разности климатических норм по разным сценариям для пяти выбранных метеостанций приведены в Таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Сценарные оценки изменения норм температур воздуха на реперных метеостанциях республика Саха (Якутия) до конца XXI века по отношению к норме за период 1976-2005 гг. в °С

Сценарий	Периоды, месяцы											
	2011-2040 гг,				2041-2070 гг,				2071-2100 гг,			
	I	IV	VII	IX	I	IV	VII	IX	I	IV	VII	IX
Верхоянск												
RCP2,6	7,4	1,9	-0,5	0,3	9,2	1,9	-0,2	1,5	9,4	2,3	0,0	1,4
RCP4,5	9,5	1,2	0,4	2,3	11,8	3,1	2,7	3,3	12,8	3,6	2,5	4,0
RCP8,5	9,6	1,4	0,3	0,4	11,9	3,6	1,3	3,4	17,0	6,3	3,7	5,9
Вилюйск												
RCP2,6	1,9	1,4	3,0	1,2	2,5	1,9	2,6	2,9	3,5	1,7	2,6	2,2
RCP4,5	3,4	0,8	3,7	2,3	4,9	1,9	4,7	3,9	6,9	2,5	5,1	4,2
RCP8,5	3,4	1,1	3,0	1,6	5,7	3,2	4,9	4,4	10,4	5,9	8,1	6,9
Олекминск												
RCP2,6	3,9	-0,4	–	2,4	4,0	0,1	–	2,5	3,0	-0,5	–	2,6
RCP4,5	2,3	-0,9	0,4	2,2	4,3	-0,1	1,0	3,3	5,3	0,4	1,6	4,0
RCP8,5	4,2	-0,6	0,1	1,8	5,1	1,1	1,3	4,8	9,4	3,4	2,1	7,2

Продолжение Таблицы 3.5

Усть-Мая												
RCP2,6	0,1	—	—	—	0,9	—	—	—	1,4	—	—	—
RCP4,5	0,7	1,6	1,7	1,1	2,9	3,8	2,7	1,9	4,3	4,3	2,8	2,6
RCP8,5	0,9	2,9	1,5	1,5	3,7	4,3	2,9	2,4	7,6	6,3	4,1	3,9
Якутск												
RCP2,6	0,6	1,7	—	0,5	1,9	2,1	—	0,4	2,4	2,0	—	0,7
RCP4,5	2,0	1,1	0,1	0,4	4,3	2,5	0,9	0,9	5,4	3,0	1,2	1,6
RCP8,5	1,4	1,3	-0,3	0,1	4,5	3,4	1,2	1,6	8,2	6,1	2,4	4,4

В качестве примера на Рисунке 3.8 показан многолетний ряд температур января и июля на МС Якутск с 1916 г., а также значения норм за период наблюдений и сценарных норм за будущие периоды до конца 21 века на основе трех основных сценариев и по моделям центра Хэдли (HadGEM2) для января и Института вычислительной математики РАН (INM) для июля, дающих наилучшее соответствие с данными наблюдений.

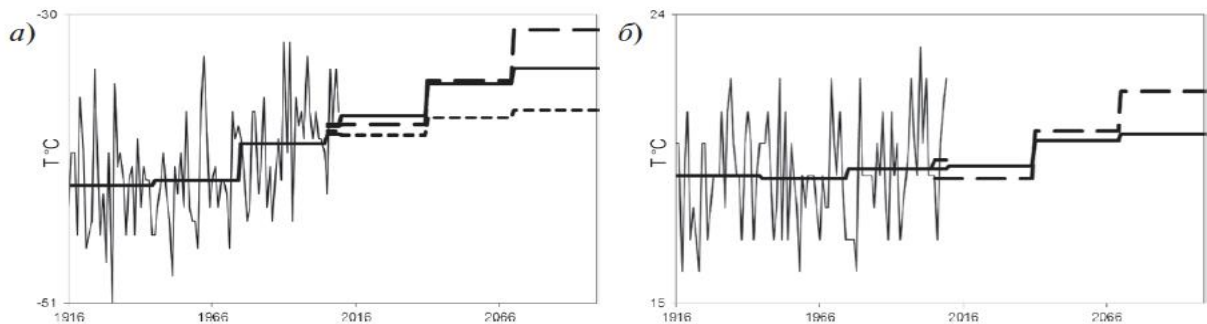


Рис.3.8 – Многолетние ряды температуры января (а) и (б) июля на метеостанции Якутск и климатические нормы по данным наблюдений и сценарных оценок до конца XXI в.

Из представленных в Таблице 3.5 результатов следует:

- наибольший рост температуры следует ожидать зимой до 4–6°C в последней трети XXI века по среднему сценарию RCP4.5, хотя по самому неблагоприятному сценарию RCP8.5 рост температур может быть до 9–10°C и даже до 17°C на метеостанции Верхоянск;
- рост весенних (апрель), летних (июль) и осенних (сентябрь) температур будет существенно ниже и в конце XXI века по RCP4.5 может составлять от 1.2°C до 5.1°C (в среднем 2–3°C, т.е. в два раза меньше, чем зимних), а наибольшие возможные значения роста по сценарию RCP8.5 могут достигать 6–8°C;
- в ближайшие годы (до 2014 г.) практически по всем сценариям рост температуры ожидается небольшим и будет составлять максимум до 3–4°C зимой (в среднем 2°C) и до 3°C в теплый период (в среднем 1°C) за исключением зимних температур на метеостанции Верхоянск, где дается увеличение до 7–9°C;

- закономерности будущего потепления по территории (если исключить метеостанцию Верхоянск как аномальную) состоят в том, что в южной, центральной и восточной частях республики следует ожидать меньшего потепления, чем в северной и западной примерно на 4–8°C зимой и на 2–3°C в теплый период года [66].

3.4 Выбор эффективной климатической модели и прогноз для осадков

Подобная процедура оценки была проведена также для атмосферных осадков. В первую очередь были построены корреляционные матрицы парных коэффициентов корреляции между рядами на выбранных реперных метеостанциях за разные сезоны года приведены. Итоги анализа показали, что коэффициенты корреляции между станциями в разных частях республики в среднем очень низкие, по сравнению с температурными данными, и связанности в зависимости от сезона года не прослеживается. Наибольшая связанность наблюдается между станциями Якутск, Олекминск и Вилюйск. Менее всего связана с остальными станция Верхоянск.

Для каждой выбранной метеостанции были рассчитаны коэффициенты корреляции между среднемесячными атмосферными осадками по данным наблюдений и климатического моделирования за совместный период, которые оказались даже еще ниже, чем для температуры воздуха. Поэтому для выбора наиболее эффективной модели климата по атмосферным осадкам для территории Якутии было проведено сравнение климатических норм, вычисленных за последовательные 30-летние периоды по результатам моделирования и наблюдений. Расчеты климатических норм и разностей между наблюдаемыми и смоделированными нормами осадков (ΔP , мм) за разные интервалы времени даны в Таблицах 3.6–3.10 для выбранных метеостанций за характерные месяцы сезонов, где жирным шрифтом выделены самые низкие отклонения смоделированных данных осадков от наблюдаемых, а в первой строке приведены нормы наблюдаемых атмосферных осадков (“наблюд.”). При этом, если разности были более 50% от абсолютной величины сумм осадков за месяц, то данные моделирования признавались неэффективными. Поэтому в некоторые месяцы моделирование было признано неэффективным по всем моделям. Приоритетными при выборе эффективной модели были последний и весь период наблюдений.

Таблица 3.6 – Разности между климатическими нормами, полученными по данным моделирования и наблюдений (мм) для метеостанции Верхоянск, Северная Якутия

Месяцы				
1946–1975				
	Январь	Апрель	Июль	Сентябрь
Наблюд.	8,2	6,3	36,0	16,3
BCC	4,5	28,1	21,1	30,5
HadGEM2	-3,2	16,3	58,3	37,5
INM	4,4	14,8	9,1	23,7
IPSL	-0,6	23,1	41,8	23,5
MPI	0,7	13,9	41,5	35,9
1961–1990				
Наблюд.	7,3	7,1	33,1	15,4
BCC	5,1	26,3	22,7	31,7
HadGEM2	-1,7	16,6	58,0	34,3
INM	4,0	14,8	10,3	25,3
IPSL	-0,7	21,3	42,3	22,8
MPI	1,7	13,5	45,0	39,1
1976–2005				
Наблюд.	6,2	5,2	36,3	17,4
BCC	5,9	26,5	20,5	32,7
HadGEM2	0,0	23,0	55,1	31,4
INM	7,3	15,6	10,3	18,3
IPSL	0,8	21,4	33,3	18,9
MPI	2,7	13,4	43,8	36,2
Весь период наблюдений				
Наблюд.	7,0	5,5	36,1	17,5
BCC	5,7	27,6	20,8	30,8
HadGEM2	-1,6	19,7	56,7	34,5
INM	5,8	15,2	9,7	21,0
IPSL	0,1	22,2	37,5	21,2
MPI	1,7	13,7	42,6	36,2

Таблица 3.7 – Разности между климатическими нормами, полученными по данным моделирования и наблюдений (мм) для метеостанции Вилюйск, Западная Якутия

Месяцы				
1916–1945				
	Январь	Апрель	Июль	Сентябрь
Наблюд.	9,8	11,5	47,5	24,5
BCC	3,9	20,6	13,3	14,4
HadGEM2	0,3	26,8	6,2	11,3
INM	0,9	5,0	-4,4	15,5
IPSL	-2,1	31,9	5,2	4,7
MPI	1,6	25,9	19,1	22,2
1946–1975				
Наблюд.	9,5	9,9	42,3	24,8
BCC	3,5	23,4	6,4	14,1
HadGEM2	-0,6	29,9	18,1	14,5
INM	0,8	16,5	1,4	14,5

Продолжение Таблицы 3.7

IPSL	-0,8	28,6	2,3	3,5
MPI	3,4	26,2	20,1	21,4
1961–1990				
Наблюд.	9,6	11,4	46,1	27,2
BCC	3,4	21,1	6,0	10,1
HadGEM2	1,3	30,2	14,1	15,0
INM	1,3	16,0	1,0	14,6
IPSL	0,5	27,5	0,8	-0,5
MPI	2,8	22,9	8,2	19,6
1976–2005				
Наблюд.	10,1	11,5	47,7	32,6
BCC	2,9	18,0	6,5	5,6
HadGEM2	2,6	33,9	1,8	5,7
INM	2,8	12,0	7,5	11,1
IPSL	-2,3	28,4	-5,8	-6,4
MPI	2,4	25,7	16,4	11,5
Весь период наблюдений				
Наблюд.	10,1	11,0	47,0	27,9
BCC	3,2	20,8	6,3	10,8
HadGEM2	0,8	30,2	8,7	10,5
INM	1,5	11,2	1,5	13,7
IPSL	-1,7	29,6	0,6	0,6
MPI	2,5	25,9	18,5	18,4

Таблица 3.8 – Разности между климатическими нормами, полученными по данным моделирования и наблюдений (мм) для метеостанции Олекминск, Южная Якутия

Месяцы				
1946–1975				
	Январь	Апрель	Июль	Сентябрь
Наблюд.	14,0	10,9	48,3	32,9
BCC	1,3	25,8	23,7	16,1
HadGEM2	0,4	41,8	43,2	37,2
INM	-0,5	21,8	22,4	27,8
IPSL	-1,4	31,3	26,1	14,8
MPI	-0,3	34,7	70,5	37,9
1961–1990				
Наблюд.	16,0	10,9	51,2	33,7
BCC	-0,9	26,2	24,5	16,9
HadGEM2	-0,5	38,7	48,1	34,3
INM	-1,5	22,6	21,0	30,4
IPSL	-4,5	35,1	26,2	12,8
MPI	-2,8	34,7	46,9	41,5
1976–2005				
Наблюд.	16,9	8,8	56,9	37,7
BCC	-1,1	25,9	18,9	9,1
HadGEM2	2,6	46,4	35,0	28,0
INM	0,5	23,4	30,8	27,0
IPSL	-5,2	38,3	21,2	8,5

Продолжение Таблицы 3.8

MPI	-3,1	38,0	37,4	35,0
Весь период наблюдений				
Наблюд.	15,5	10,2	51,7	37,8
BCC	0,3	25,5	20,9	10,0
HadGEM2	1,5	44,1	39,1	32,6
INM	0,0	22,6	26,6	27,4
IPSL	-3,3	34,8	23,7	11,7
MPI	-1,7	36,4	54,0	36,5

Таблица 3.9 – Разности между климатическими нормами, полученными по данным моделирования и наблюдений (мм) для метеостанции Усть-Мая, Восточная Якутия

Месяцы				
1946–1975				
	Январь	Апрель	Июль	Сентябрь
Наблюд.	9,7	11,5	48,3	30,8
BCC	6,4	24,7	32,1	22,9
HadGEM2	1,6	40,0	49,7	32,8
INM	5,7	24,8	23,5	42,9
IPSL	2,3	34,3	29,5	17,7
MPI	10,0	35,4	51,6	55,4
1961–1990				
Наблюд.	10,1	13,0	53,2	35,2
BCC	5,5	22,7	24,4	24,6
HadGEM2	2,0	36,7	46,8	26,2
INM	3,9	25,4	15,4	36,7
IPSL	1,8	33,1	20,8	7,5
MPI	10,1	33,6	44,0	46,5
1976–2005				
Наблюд.	10,9	10,8	50,2	40,1
BCC	4,5	26,9	35,1	25,3
HadGEM2	1,4	44,0	45,1	30,7
INM	3,7	27,9	29,3	29,2
IPSL	2,0	36,8	28,3	2,7
MPI	9,9	37,8	46,9	40,7
За весь период наблюдений				
Наблюд.	10,4	11,4	49,9	35,3
BCC	5,4	26,8	33,8	24,0
HadGEM2	1,5	42,0	47,4	31,7
INM	4,7	26,3	26,4	35,9
IPSL	2,1	35,5	28,9	10,1
MPI	9,9	36,6	49,2	48,0

Таблица 3.10 – Разности между климатическими нормами, полученными по данным моделирования и наблюдений (мм) для метеостанции Якутск, Центральная Якутия

Месяцы				
1916–1945				
	Январь	Апрель	Июль	Сентябрь
Наблюд.	–	–	–	22,8
BCC	–	–	–	28,1
HadGEM2	–	–	–	20,0
INM	–	–	–	26,2
IPSL	–	–	–	11,9
MPI	–	–	–	23,6
1946–1975				
Наблюд.	10,8	10,4	43,5	24,9
BCC	3,3	25,9	22,3	22,6
HadGEM2	-2,4	24,8	24,8	17,8
INM	-0,9	15,6	12,9	25,9
IPSL	-1,7	27,6	6,2	8,7
MPI	1,4	18,3	24,6	22,9
1961–1990				
Наблюд.	8,9	9,8	39,4	28,7
BCC	4,6	26,6	29,1	22,5
HadGEM2	0,5	27,2	30,9	9,6
INM	1,1	18,6	13,9	22,5
IPSL	0,4	29,4	13,1	1,9
MPI	2,6	18,8	33,6	16,1
1976–2005				
Наблюд.	8,4	7,0	38,3	31,4
BCC	4,7	29,2	33,6	20,9
HadGEM2	1,7	36,1	23,8	13,0
INM	3,0	21,5	23,6	17,7
IPSL	0,9	31,1	18,7	2,5
MPI	4,2	25,0	38,9	8,9
За весь период наблюдений				
Наблюд.	9,6	8,8	40,4	26,6
BCC	4,3	28,4	27,9	23,5
HadGEM2	-0,4	30,5	24,3	16,9
INM	1,0	18,6	18,3	23,3
IPSL	-0,4	29,4	12,4	7,7
MPI	2,8	21,7	31,8	18,4

Анализ данных в таблицах показывает, что весной (апрель), когда осадков еще немного, то ни одна климатическая модель не является эффективной и погрешности превышают 50%. Наиболее эффективно модели воспроизводят зимние осадки, которые, хотя и невелики по абсолютной величине (8-16 мм в зависимости от станции), но и практически все модели также дают их невысокие значения. Поэтому для января часто эффективными являются несколько моделей сразу. Летом и осенью осадков в несколько раз больше, чем в холодный период года, но

и их эффективность расчета ниже, чем в январе и погрешность составляет десятки процентов. Поэтому для отдельных метеостанций в этот сезон также может не подходить ни одна из моделей.

Обобщенная информация о наиболее эффективных климатических моделях для каждой из пяти метеостанций и для характерных месяцев по всем сезонам года приведена в Таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Выбор климатических моделей для прогноза осадков для метеостанций Якутии

Станция	Месяцы			
	Январь	Апрель	Июль	Сентябрь
Верхоянск	Had/IPSL/ MPI	Нет	INM	Нет
Вилуйск	Had/INM/ IPSL/MPI	Нет	Had/INM	Had/BCC/ IPSL
Олекминск	INM/BCC/ Had	Нет	BCC	IPSL
Усть-Мая	Had/ IPSL	Нет	Нет	IPSL
Якутск	IPSL/Had/ INM	Нет	IPSL/INM	IPSL/MPI

На основе выбранных климатических моделей был подготовлен прогноз изменения осадков на территории республики до 2100 г., разделенный на три последующих 30-летних периода времени до конца XXI в.: 2011–2040 гг., 2041–2070 гг. и 2071–2100 гг. Оценка производилась по трем основным сценариям: RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5 по отношению к норме 1976–2005 гг. и с учетом систематической погрешности модельных данных за этот интервал времени.

Полученные разности климатических норм атмосферных осадков по выбранным климатическим сценариям для выбранных метеостанций приведены в Таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Сценарные оценки изменения норм атмосферных осадков на реперных метеостанциях Республики Саха (Якутия) до конца XXI века по отношению к норме за период 1976–2005 гг. в мм./ в %

Сценарий	Периоды, месяцы								
	2011–2040 гг,			2041–2070 гг,			2071–2100 гг,		
	I	VII	IX	I	VII	IX	I	VII	IX
	Верхоянск								
RCP2,6	0,7/11	–	–	1,3/21	–	–	1,5/24	–	–
RCP4,5	1,3/21	9,6/25	–	2,2/35	8,3/23	–	1,9/31	10,8/30	–
RCP8,5	1,2/19	13,6/38	–	1,8/29	19,9/55	–	5,9/95	18,2/50	–
	Вилуйск								
RCP2,6	2,9/28	1,1/2	-11,0/-34	2,2/22	9,3/19	-17,5/-54	3,7/36	-24,7/-52	-10/-31

Продолжение Таблицы 3.12

RCP4,5	3,3/32	-1,3/-3	-5,0/-15	3,7/36	3,5/7	-5,5/-17	7,6/75	5,8/12	-2,5/-8
RCP8,5	3,0/29	1,2/3	–	4,1/40	1,8/4	–	10,1/99	0,7/2	–
	Олекминск								
RCP2,6	1,8/11	26,6/47	16,5/44	2,6/15	27,8/49	38,1/101	1,4/8	45,8/80	41,4/110
RCP4,5	-0,3/-2	29,8/52	4,5/12	2,1/12	34,3/60	19,5/52	3,5/21	35,2/62	28,4/75
RCP8,5	3,0/18	29/51	–	4,1/24	14,8/26	–	7,1/42	26,1/46	–
	Усть-Мая								
RCP2,6	3,3/30	–	22,4/56	4,9/45	–	15,5/39	5,1/46	–	25,9/65
RCP4,5	3,5/32	–	11,1/28	7,3/66	–	25,6/64	7,6/69	–	24,1/60
RCP8,5	3,6/33	–	–	7,4/67	–	–	13,8/125	–	–
	Якутск								
RCP2,6	2,2/26	–	18,6/59	2,7/32	–	17,9/57	2,6/31	–	17,2/55
RCP4,5	1,8/21	26,2/68	20,6/66	4,3/51	23,8/62	12,6/40	5,1/61	39,5/103	21,5/68
RCP8,5	2,3/27	31,1/81	–	4,2/49	40,7/106	–	8,9/106	50/131	–

В целом по всей территории Якутии в будущем произойдет рост осадков: зимой и осенью в пределах от 10 до 60%. Наибольший рост количества осадков ожидается в летний период, на некоторых станциях количество осадков увеличится в два раза. При этом для станции Вилуйск в Западной Якутии ожидается значительное снижение осадков.

4. Примеры оценки динамики климатических индикаторов на территории Якутии

В предыдущих двух главах выполнена оценка современных и будущих изменений таких основных климатических факторов, как температура воздуха и осадки на территории Якутии. Особенности современного и будущего изменения температур воздуха и осадков на территории Якутии изучены и представлены также и в опубликованных работах [62; 63; 66], из которых следует, что температура воздуха выросла и стала более нестационарной в последние годы, а в осадках таких явных и устойчивых закономерностей не установлено, хотя также имеет место тенденция их роста. Вместе с тем не меньший интерес представляет отклик других природных показателей на изменение температуры и осадков.

Для разработки региональной климатической программы необходимо решить следующую важную задачу: определить, как изменение основных климатических факторов влияет на следующий уровень климатических характеристик, который представляют собой прикладные климатические характеристики или климатические индикаторы [67]. Эти индикаторы в свою очередь оказывают прямое влияние на различные отрасли экономики и учитываются при проектировании и эксплуатации различных систем, сооружений и объектов. Именно такие климатические индикаторы рассматриваются в рабочих группах МГЭИК, исследующих адаптацию, уязвимость и смягчение воздействий на изменение климата [68; 69].

В настоящей главе рассматривается динамика трех основных климатических индикаторов на территории Республики Саха. Это:

- количество и площади пожаров по отдельным лесничествам, которые определяются степенью засушливости климата;
- температура почвы на разных глубинах, которая характеризует свойства вечной мерзлоты;
- максимальные расходы и уровни воды, характеризующие интенсивность весеннего половодья.

Каждый из рассматриваемых климатических индикаторов является важным фактором для экономики республики. Так, лесные пожары – это не только опасное природное явление, но и фактор, влияющий на лесное и сельское хозяйство, здоровье людей, инфраструктуру. Температура почвы и ее динамика является важным фактором в сельском хозяйстве, строительстве, транспорте. Максимальные расходы и уровни весеннего половодья определяют, как опасные условия затопления, так и показатели гидроэнергетики, сельского и коммунального хозяйства.

4.1 Динамика пожаров на территории Республики Саха (Якутия)

Лесопожарная активность в республике начала расти со второй половины XX в., также, как и экономический ущерб от лесных пожаров. Лесные пожары уже сейчас создают огромную потенциальную угрозу для Якутии. Ежегодно республика тратит баснословные финансовые средства на борьбу с лесными пожарами, например, 4 116 210 881,69 руб. – в 2013-м и 3 805 684 668,02 руб. – в 2014-м гг. (согласно статистическим данным Департамента лесного хозяйства Республики Саха (Якутия)). При этом важно понимать, что финансовые расходы показывают только одну сторону ущерба от лесных пожаров – экономическую. Расходы на тушение действующих и предотвращение потенциальных лесных пожаров, воздействие смога от пожаров на здоровье населения, особенно его наиболее уязвимые группы – детей и людей пожилого возраста, потеря лесного фонда и угроза его биоразнообразию, упущенные рекреационные возможности, все это имеет свою собственную цену, во много раз перекрывающую экономический ущерб от лесных пожаров [70]. Согласно прогнозным оценкам риск лесных пожаров будет расти и в дальнейшем под воздействием изменения климатических и погодных условий.

Для оценки влияния современных изменений климата на лесные пожары в республике необходимо было решить следующие задачи:

- исследовать динамику таких основных характеристик как число и площадь пожаров;
- найти статистические взаимосвязи между исторически наблюдаемой лесопожарной активностью и изменениями климатических параметров на примере температуры воздуха и атмосферных осадков;
- располагая сценарными оценками среднемесячных температур воздуха и осадков на основе установленных взаимосвязей с показателями пожаров дать их перспективные характеристики на будущее.

Якутия, занимающая большую часть Восточной Сибири, является одним из наиболее пожароопасных регионов нашей страны. Лесные пожары в республике наблюдаются с мая по сентябрь, с наивысшей долей в летние месяцы, с максимумом во второй половине лета: в июле и августе. Результаты исследований якутских ученых Института космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН показали, что пожары в мае и сентябре вызваны в первую очередь человеческим фактором, а, именно, ненадлежащими действиями людей, посещающих лес с хозяйственной или рекреационной целями, а большинство майских пожаров случилось вследствие неконтролируемых сельхозпалов, в свою очередь, пожары середины лета – были вызваны влиянием погодных условий [71], что позволяет сделать вывод о том, что в контексте

климатических изменений имеет смысл рассматривать пожары, происходящие с июня по август [72].

В работе рассматривались количество и площади пожаров естественного происхождения на территории республики за период 1955–2014 гг. на основании информации по 19 лесничествам, расположение которых приведено на Рис.4.1. В связи с тем, что лесничества имеют разную площадь, то и число, и площади пожаров были пересчитаны на единицу площади – 1 км², чтобы данные можно было сопоставлять по территории и выявить районы с наибольшей интенсивностью пожаров. Рассчитанные коэффициенты корреляции между числом и площадью пожаров свидетельствуют, что эти два показателя практически не связаны между собой и наибольшие коэффициенты корреляции составляют 0,48–0,55 всего для шести лесничеств. Наибольшая средняя многолетняя относительная площадь пожаров приходится на Якутское, Вилюйское и Амгинское лесничества и составляет соответственно 0,61%, 0,42% и 0,36%. В северных лесничествах (Жиганское, Индигирское, Томпонское) относительная площадь пожаров наименьшая и составляет соответственно: 0,02%, 0,02%, 0,06%, что связано как с их существенно большей площадью (Рисунок 4.1), так и с более низкой температурой летних месяцев.



Рисунок 4.1 – Карта лесничеств и лесозащитное районирование республика Саха (Якутия)

Анализ многолетних графиков числа пожаров позволил установить отсутствие трендов роста числа пожаров, и что можно говорить только или о стационарном режиме колебаний, что характерно для лесничеств: Ленского, Верхневилуйского, Вилюйского, Мирнинского, Нюрбинского, Горного, Хангаласского, Сунтарского, или о росте дисперсии числа пожаров, как

для Якутского и Амгинского при незначительном росте средних значений числа пожаров (Рисунок 4.2). Для остальных лесничеств характерно снижение числа пожаров, что особо наглядно проявляется на примерах Рисунке 4.3.

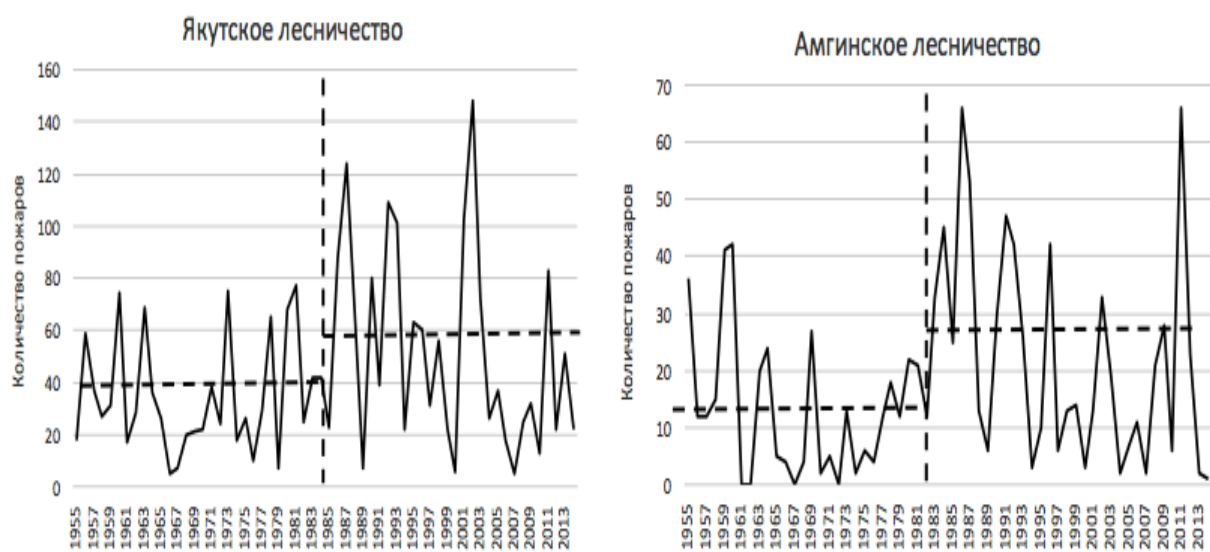


Рисунок 4.2 – Динамика числа пожаров в Якутском и Амгинском лесничествах

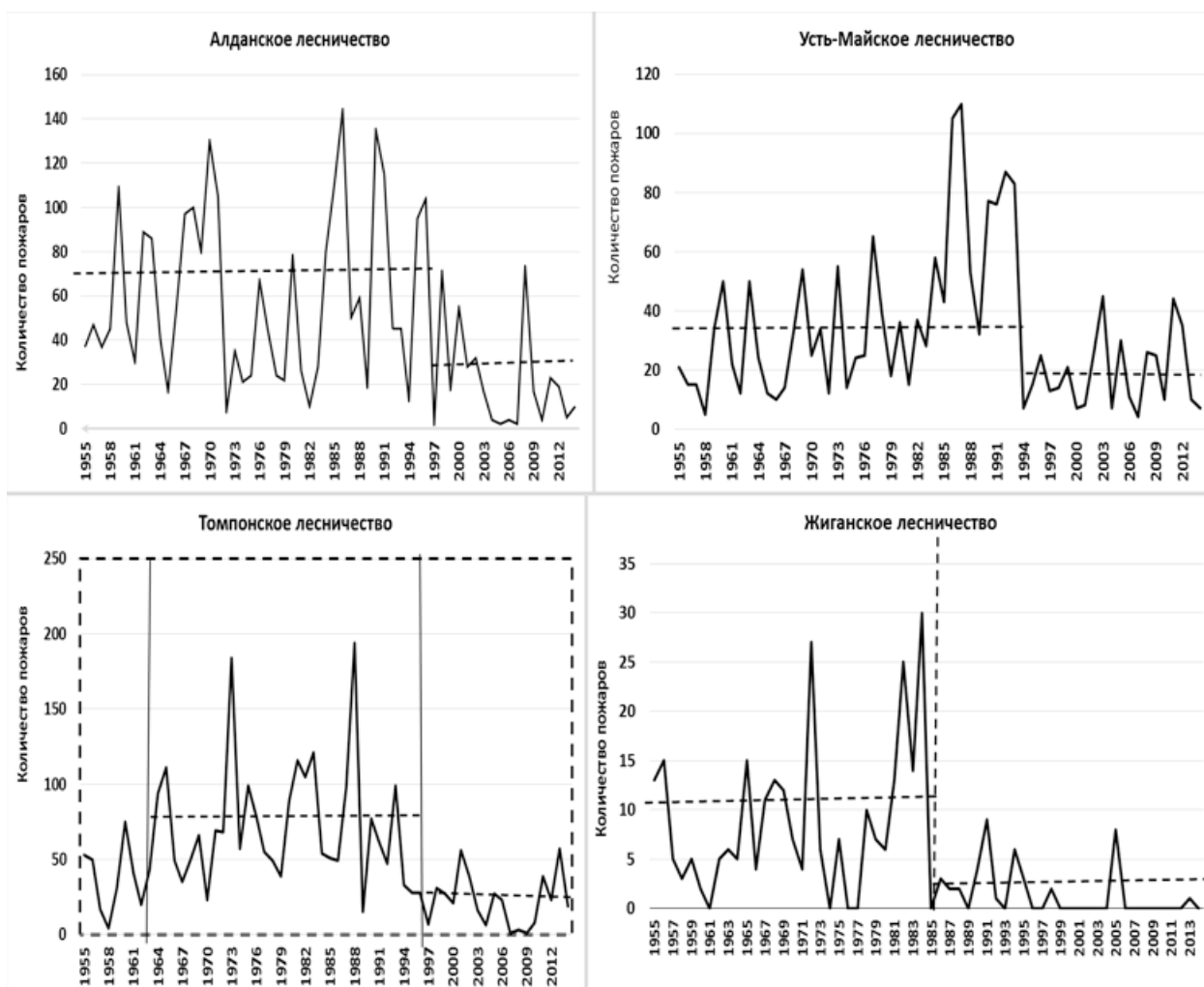


Рисунок 4.3 – Уменьшение числа пожаров в некоторых лесничествах Якутии

Анализ многолетних рядов площадей пожаров также свидетельствует, что каких-либо направленных трендов роста или уменьшения в них нет, а есть периоды разной дисперсии, а также период с практическим отсутствием площади пожаров, который разный в разных лесничествах с самым ранним началом – 1965 г. и окончанием – середина, конец 1980-х, а иногда и 1990-е годы. Типичные примеры многолетних рядов площадей пожаров и выделенные в них однородные периоды показаны на Рисунке 4.4.

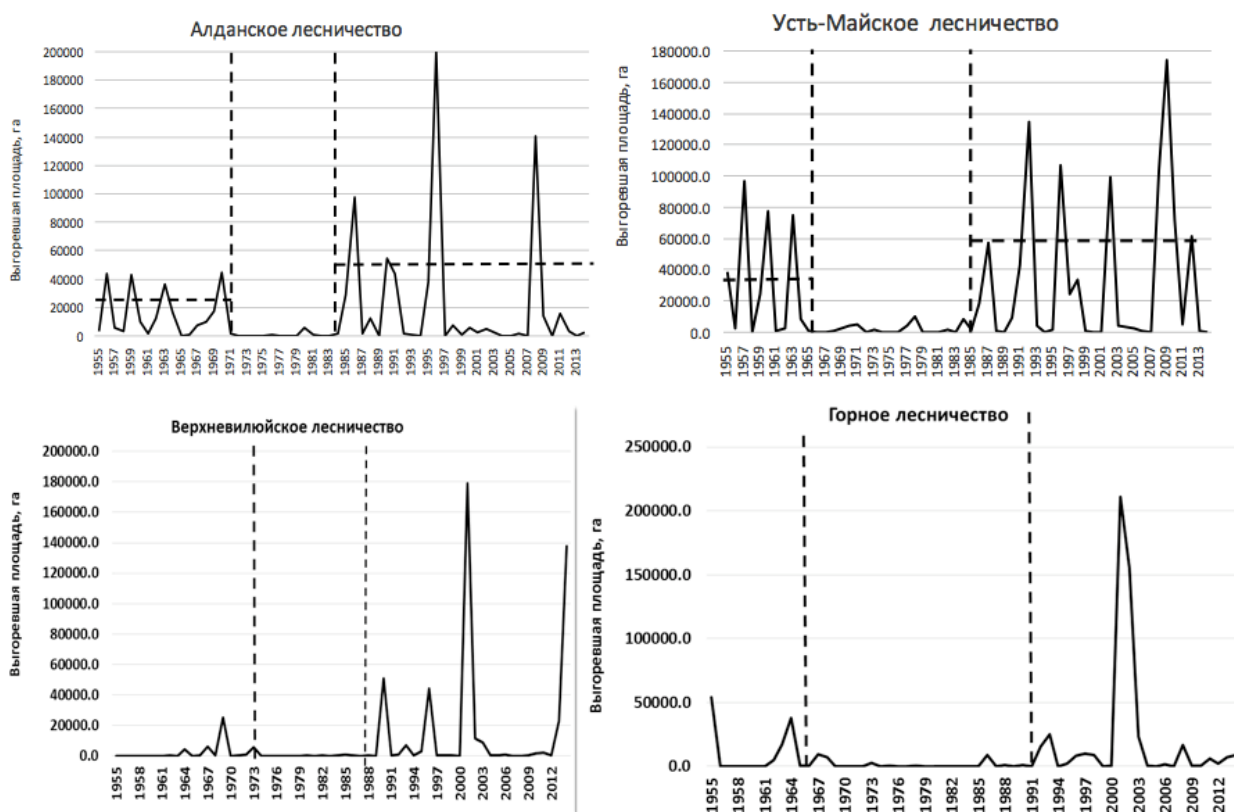


Рисунок 4.4 – Многолетние ряды площадей пожаров и выделенные в них однородные периоды

Как следует из Рис.4.4, наиболее существенно изменяется дисперсия площадей пожаров, которая в свою очередь приводит и к изменению их средних значений. Вместе с тем, в северных лесничествах (Индибирское, Томпонское, Жиганское) каких-либо изменений площадей не установлено. Наибольший рост дисперсий площадей пожаров наблюдается в центральных и юго-восточных лесничествах. В Табл.4.1 для этих лесничеств приведены периоды однородных дисперсий, рассчитанная статистика критерия Фишера (F) – отношение дисперсий, а также отношение средних (f_{cp1}/f_{cp2}) и наибольших (f_{max1}/f_{max2}) площадей пожаров за два однородных периода. Кроме того, приводится и коэффициент корреляции R между числом и площадью пожаров, низкие значения которого подтверждают, что число пожаров практически не связано с их площадью. В интервал времени, который находится между этими двумя квазистационарными

периодами, площади пожаров были очень малы и его можно считать, как период отсутствия пожаров.

Таблица 4.1 – Характеристики площадей пожаров за два квазигодных периода

<i>Лесничество</i>	<i>Период 1</i>	<i>Период 2</i>	<i>F</i>	<i>f_{cp1}/f_{cp2}</i>	<i>f_{max1}/f_{max2}</i>	<i>R</i>
Амгинское	1955–67	1987–2014	1,85	0,89	2,1	0,51
Верхневиллюйское	1955–75	1991–2014	52,5	6,84	7,16	0,30
Виллюйское	1955–74	2001–2014	14,08	4,28	3,63	0,10
Горное	1955–71	1992–2014	8,62	1,91	3,89	0,35
Нерюнгринское	1975–97	2007–2014	5,55	1,99	1,53	0,22
Усть-Майское	1955–66	1987–2014	1,84	1,23	1,80	0,20
Якутское	1955–67	2000–2014	3,19	1,20	1,88	0,48
Мегино-Кангаласское	1955–75	1986–2014	7,05	2,61	3,02	0,38
Алданское	1955–72	1984–2014	8,07	1,58	–	0,55

Из результатов Таблицы 4.1 следует, что для 8 из 10 представленных в ней лесничеств за исключением Амгинского и Усть-Майского, расчетные значения статистик критерия Фишера превышают критические даже при уровне значимости 1%. Хотя средние значения за два однородных периода и различаются существенно (в 2,5 раза в среднем), но их оценка по критерию Стьюдента не производилась, т.к. эти изменения средних связаны с неоднородностью дисперсий. Для восьми лесничеств со статистически значимым ростом дисперсий площадей пожаров были выбраны предполагаемые климатические факторы: температура воздуха и осадки как за каждый летний месяц, так и средние за сезон, а также как за весь непрерывный совместный период с 1955 по 2014 гг., так и только за два квазистационарных полупериода. В результате получены следующие наиболее эффективные регрессионные зависимости за однородные периоды:

$$F_{\text{пож}}=26,18 T_6 - 11,64T_5 - 0,166P_8 - 4,438T_7 - 202,8 \text{ (Нерюнгринское, 1999-2013), } R=0,93 \text{ (4.1)}$$

$$F_{\text{пож}}=10,157 T_{\text{лет}} - 7,394T_5 - 113,33 \text{ (Виллюйское, 1955-74), } R=0,88 \text{ (4.2)}$$

$$F_{\text{пож}}=-1,322 P_9 + 20,60T_8 - 254,2 \text{ (Якутское, 2000-2013), } R=0,68 \text{ (4.3)}$$

$$F_{\text{пож}}=25,6T_5 + 8,62T_6 + 16,13T_8 + 12,4T_9 - 80,57T_{\text{сез}} - 0,792P_7 - 1,02P_9 + 471,1, \\ \text{(Усть-Майское, 1987-2013), } R=0,65, \text{ (4.4)}$$

где: $F_{\text{пож}}$ – площадь пожаров в тыс. га, $T_{\text{лет}}$, $T_{\text{сез}}$ – средняя температура за лето и весь сезон с мая по сентябрь, T_i – средняя температура за каждый i -ый месяц, P_i – суммы осадков за каждый i -ый месяц, R – коэффициент множественной корреляции.

Из уравнений (4.1)–(4.4) в основном следует, что площадь пожаров тем больше, чем выше температура и меньше осадков. Для остальных лесничеств и за весь период наблюдений эмпирические уравнения, связывающие площади пожаров и метеорологические факторы получились менее эффективными с коэффициентами корреляции $R=0,4–0,6$. Такая низкая эффективность уравнений может быть связана и с тем, что для всей площади каждого лесничества была выбрана только одна метеостанция, что явно недостаточно для обобщения осадков. Вместе с тем и такие уравнения можно применять для определения значений за каждый год, по которым затем с меньшими погрешностями рассчитываются климатические нормы за разные периоды в будущем на основе сценарных оценок осадков и температур.

На основе наилучших уравнений (4.1)–(4.2) был проведен расчет того, какие площади пожаров ожидаются в 21 веке на основе выбранной климатической модели (расчеты проводились в третьей главе данного диссертационного исследования) и среднего сценария (RCP 4). Результаты проведенной оценки представлены в Таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Оценка будущих площадей пожаров на территории Якутии, тыс. га

Вилюйское лесничество	RCP 4		
	2011–2040	2041–2070	2071–2100
	105,9	120,7	126,7
Нерюнгринское лесничество	RCP 4		
	2011–2040	2041–2070	2071–2100
	40,6	41,6	49,9

4.2 Динамика температуры почвы на территории Республики Саха (Якутия)

Следующим рассматриваемым климатическим индикатором была температура почвы на разных глубинах (1,6, 2,4 и 3,2 м) в мае и апреле, измеряемая на пяти метеостанциях Якутии (Рисунок 4.5), находящихся в ее разных частях: Олекминск (код станции 24944, юго-запад), Охотский Перевоз (24871, восток), Чурапча (24768, центр), Верхоянск (24266, север), Оленок (24125, северо-запад). В рассматриваемых месяцах происходит оттаивание почвы, то есть переход температуры через 0°C , что определяет динамику вечной мерзлоты. Временные ряды

температур почвы были аппроксимированы тремя видами моделей: стационарная выборка и две нестационарные альтернативы: модель линейного тренда и ступенчатых изменений и найдены относительные разности между стандартными отклонениями остатков стационарной модели и двух нестационарных. где: $\Delta_{тр}$, $\Delta_{ступ}$ – относительные отличия (в %) модели тренда и модели ступенчатых изменений от модели стационарной выборки; σ_y , σ_e , $\sigma_{ступ}$ – стандартные отклонения остатков соответственно моделей случайной выборки, линейного тренда и ступенчатых изменений.

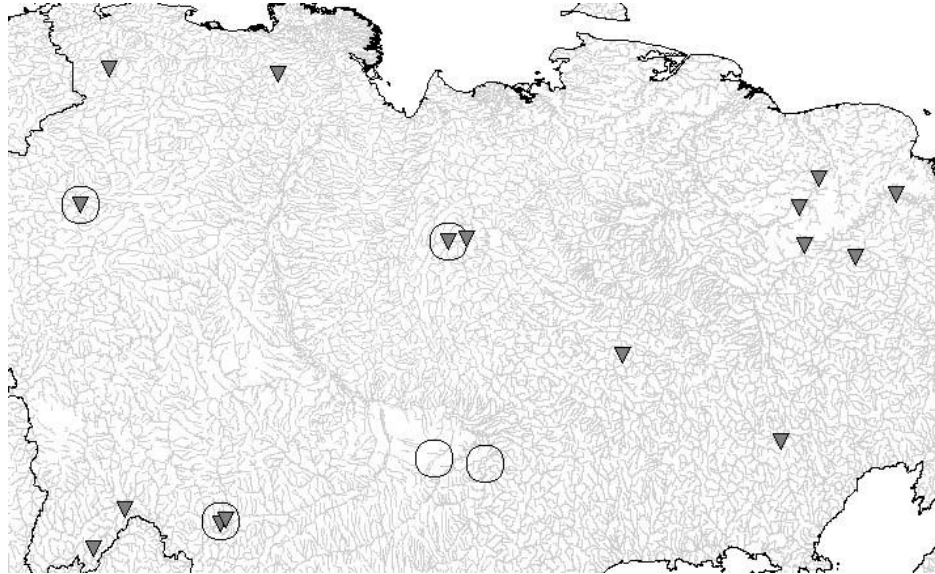


Рисунок 4.5 – Схема размещения пунктов наблюдений за температурой почвы (окружности) и расходами и уровнями воды (треугольники) на территории республики Саха (Якутия)

В Таблице 4.3 приведены основные характеристики нестационарных моделей: $\Delta_{тр}$, $\Delta_{ступ}$ – относительные отличия (в %) модели тренда и модели ступенчатых изменений от модели стационарной выборки; расчетные значения критерия Фишера $F_{тр}$ и $F_{ступ}$ (отношения остаточной дисперсии стационарной модели к остаточной дисперсии нестационарной), год установленных ступенчатых изменений (Год ст.), год начала и окончания наблюдений (Год нач. и Год кон.), продолжительность временного ряда (n , лет), коэффициент корреляции модели тренда (R). Кроме температур почвы для наиболее нестационарных случаев (метеостанции 24768 и 24944) приведены также характеристики нестационарных моделей и температур воздуха.

Таблица 4.3 – Характеристики нестационарных моделей температур воздуха и почвы на глубинах

Код станции	$\Delta_{тр}$	$\Delta_{ступ}$	$F_{тр}$	$F_{ступ}$	Год ст.	Год нач.	Год кон.	n	R
Апрель, температура воздуха									
24768	18,5	17,5	1,51	1,47	1974	1961	2011	47	0,58

Продолжение Таблицы 4.3

24944	7,3	9,9	1,16	1,23	1975	1961	2013	52	0,38
Апрель, глубина 1,6 м									
24125	0,2	1,6	1	1,03	1980	1967	2013	43	0,07
24266	5,3	10,8	1,12	1,26	1994	1967	2005	34	-0,32
24768	10,6	22,8	1,25	1,68	1976	1961	2013	49	0,45
24871	1,8	9,7	1,04	1,23	1989	1961	2013	48	0,19
24944	33,7	33,7	2,28	2,27	1982	1961	2013	49	0,75
Апрель, глубина 2,4 м									
24944	29,1	39,3	1,99	2,71	1978	1961	1995	30	0,71
Апрель, глубина 3,6 м									
24266	0,1	2,4	1	1,05	1990	1967	2009	37	0,04
24768	9	24	1,21	1,73	1976	1961	2013	50	0,41
24871	1,1	6,9	1,02	1,15	1989	1961	2013	49	0,14
24944	37,4	41,4	2,55	2,91	1976	1961	2009	43	0,78
Май, температура воздуха									
24768	14,2	17,9	1,36	1,48	1971	1961	2011	50	0,51
24944	4,1	4,4	1,09	1,10	1989	1961	2013	51	0,28
Май, глубина 1,6 м									
24125	3,7	5,9	1,08	1,13	2002	1967	2013	39	0,27
24266	0	3,8	1	1,08	1983	1967	2013	40	-0,03
24768	16,7	26,7	1,44	1,86	1976	1961	2013	51	0,55
24871	0,7	3,8	1,01	1,08	1989	1961	2013	47	0,12
24944	19,9	24,2	1,56	1,74	1981	1961	2013	49	0,6
Май, глубина 2,4 м									
24944	32,2	42,6	2,18	3,03	1977	1961	1995	31	0,74
Май, глубина 3,2 м									
24266	3,7	10,9	1,08	1,26	1999	1967	2013	40	0,27
24768	10,3	23,3	1,24	1,7	1976	1961	2013	50	0,44
24871	2,6	9,6	1,05	1,22	1989	1961	2013	49	0,23
24944	23,1	31,9	1,69	2,16	1978	1961	2008	44	0,64

Из результатов Таблицы 4.3 следует, что статистически значимо нестационарными с наибольшими $\Delta_{тр}$ и $\Delta_{ступ}$ являются ряды температуры почвы на метеостанциях Олекминск (24944) и Чурапча (24768), находящихся в центре и на юге. Наиболее эффективной в случае нестационарности является модель ступенчатых изменений, а не линейного тренда. На Рисунке 4.6 приведены временные ряды температур почвы на разных глубинах за апрель и май на метеостанции Олекминск и выделенные квазиоднородные периоды.

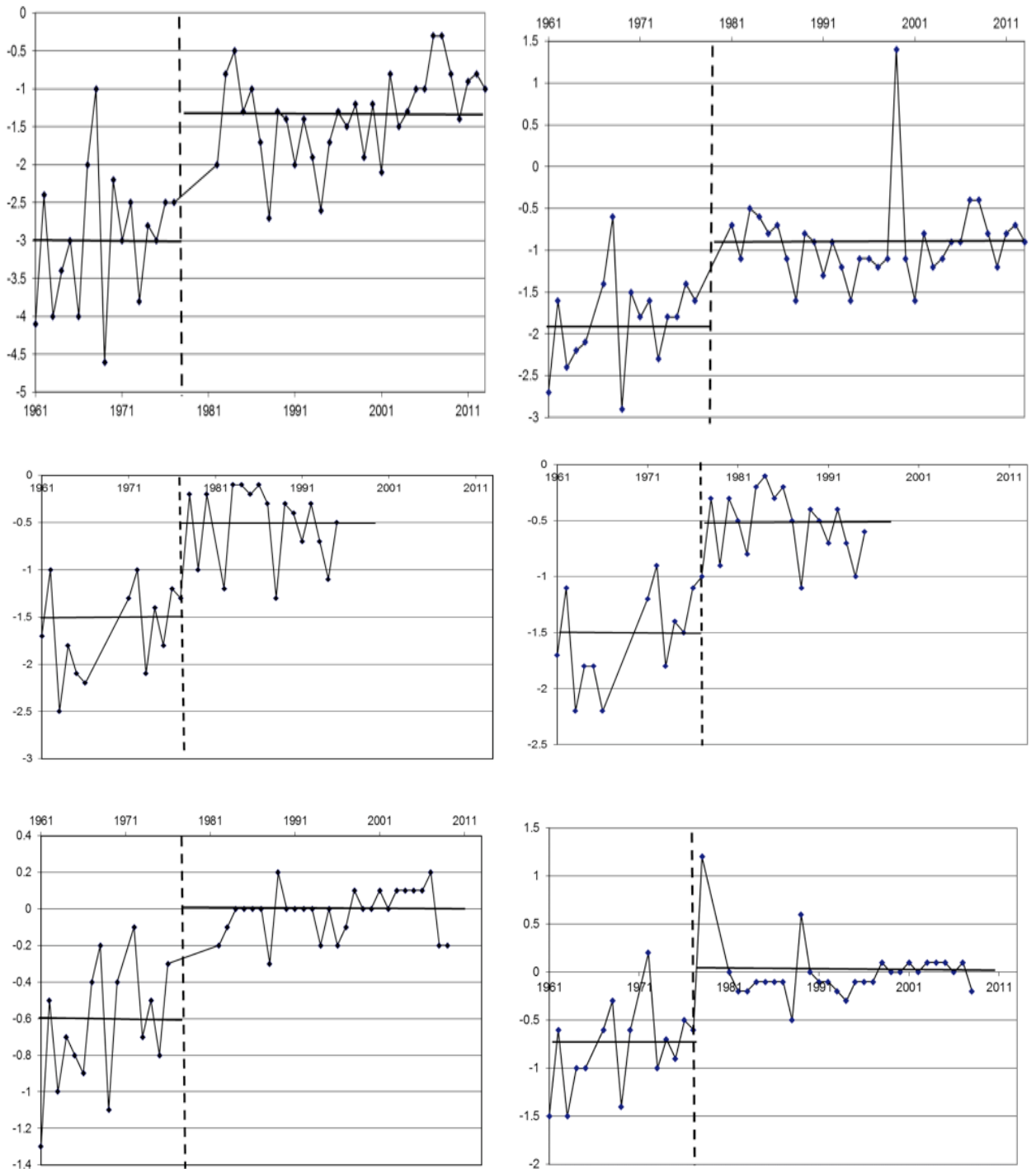


Рисунок 4.6 – Динамика температуры почвы на глубинах 1,6 м, 2,4 м и 3,2 м (сверху вниз) на метеостанции Олекминск за апрель (слева) и май (справа)

Из графиков, представленных на Рисунке 4.6 следует, что резкое повышение температуры почвы в среднем на $1,0^{\circ}\text{C}$ приходится на конец 1970-х–начало 1980-х, причем чем ближе к поверхности, тем эти изменения больше. Например, в апреле на глубине 3,2 м средний рост температуры составляет $0,6^{\circ}\text{C}$, на глубине 2,6 м – $1,0^{\circ}\text{C}$ и на глубине 1,6 м – $1,7^{\circ}\text{C}$. Хотя в эти месяцы еще и наблюдается зимняя стратификация потока тепла (из глубины к поверхности), но температуры на глубине 3,2 м уже довольно часто могут превышать нулевые отметки, что ведет

к оттаиванию мерзлоты. На метеостанции Чурапча средний подъем температуры еще выше и составляет 3°C в апреле и 1,5–2,0°C в мае. На метеостанции Верхоянск некоторый подъем температуры с $\Delta_{\text{ступ}}$ чуть более 10,9% не является статистически значимым. На метеостанциях Охотский Перевоз и Оленек каких-либо изменений температуры почвы не установлено.

Температуры почвы на разных глубинах связаны между собой, также, как и с температурой воздуха, следующими уравнениями (для метеостанции Олекминск):

$$\text{апрель} \quad T_{1,6} = 0,310T_0 - 0,86 \quad R=0,60 \quad (4.5)$$

$$T_{2,4} = 0,681T_{1,6} + 0,53 \quad R=0,95 \quad (4.6)$$

$$T_{3,6} = 0,477T_{2,4} + 0,17 \quad R=0,89 \quad (4.7)$$

$$T_{3,6} = 0,298T_{1,6} + 0,31 \quad R=0,86 \quad (4.8)$$

$$\text{май} \quad T_{1,6} = 0,115T_0 - 2,08 \quad R=0,35 \quad (4.9)$$

$$T_{2,4} = 1,009T_{1,6} + 0,45 \quad R=0,97 \quad (4.10)$$

$$T_{3,6} = 0,786T_{2,4} + 0,39 \quad R=0,83 \quad (4.11)$$

$$T_{3,6} = 0,482T_{1,6} + 0,29 \quad R=0,75, \quad (4.12)$$

где: T_0 , $T_{1,6}$, $T_{2,4}$, $T_{3,6}$ – среднемесячные температуры воздуха и на глубинах 1,6 м, 2,4 м и 3,2 м, R – коэффициент корреляции уравнения.

Рассмотрев зависимости (4.5)-(4.12), можно сделать два важных вывода: температуры почвы на соседних уровнях хорошо связаны между собой, и что температура воздуха достаточно слабо связана с температурой почвы даже на глубине 1,6 м в весенние месяцы. Для метеостанции Чурапча надежные уравнения получены для связи температуры на глубинах 1,6 м и 3,2 м с $R=0,92-0,93$ и намного менее надежно коррелирует приземная температура воздуха с температурой почвы на глубине 1,6 м с $R=0,37$ и $R=0,45$ в апреле и мае соответственно.

Чтобы оценить устойчивость зависимостей между температурой воздуха и почвы на глубине 1,6 м они были рассчитаны за каждый из двух квазистационарных периодов температур почвы. Для метеостанции Олекминск получено, что в первый стационарный период (1961–1977

гг.) для апреля зависимость лучше с $R=0,74$, а за второй (1982–2013 гг.) хуже с $R=0,26$, чем за весь совместный (1961–2013 гг.) с $R=0,60$. Для мая зависимости за два разных полупериода практически не отличались от уравнения (4.12) с низким коэффициентом корреляции.

Анализ моделей температур воздуха (Табл.4.3) свидетельствует о том, что для метеостанции Чурапча нестационарная модель является эффективной как в апреле, так и в мае, а для метеостанции Олекминск – не эффективна ни в один из этих месяцев. Вместе с тем как температура воздуха, так и почвы растут и средние их значения за два полупериода увеличиваются на $1,5^{\circ}\text{C}$ в апреле и на $0,9^{\circ}\text{C}$ в мае. Просто для температуры воздуха на метеостанции Олекминск имеет место большая естественная изменчивость, не позволяющая надежно идентифицировать климатический рост температуры.

Хотя уравнения, связывающие температуру воздуха и почвы, и имеют невысокие коэффициенты корреляции, но они также могут быть использованы для восстановления значений температур почвы в будущем по сценарным оценкам температур воздуха и для расчета норм температур почвы уже с меньшими погрешностями.

На основе уравнений (4.5)–(4.12) была проведена оценка будущих температур почвы на протяжении 21 века на основе выбранной модели и среднего сценария (RCP 4), которая представлена в Таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Оценка будущих значений температуры почвы на разных глубинах для метеостанции Олекминск, Южная Якутия, $^{\circ}\text{C}$

Апрель							
Глубины, м	Ист. норма	2011–2040	Разность	2041–2070	Разность	2071–2100	Разность
1,6	-1,9	-2,1	- 0,2	-1,8	0,1	-1,7	0,2
2,4	-1,0	-0,9	0,1	-0,7	0,3	-0,7	0,3
3,2	-0,2	-0,3	-0,1	-0,1	0,1	-0,1	0,1
Май							
Глубины, м	Ист. норма	2011–2040	Разность	2041–2070	Разность	2071–2100	Разность
1,6	-1,2	-1,1	0,1	-1,0	0,2	-0,9	0,3
2,4	-0,9	-0,6	0,3	-0,6	0,3	-0,5	0,4
3,2	-0,3	-0,1	0,2	-0,1	0,2	0,0	0,3

4.3 Динамика характеристик максимального стока на реках республики

Следующим рассматриваемым климатическим индикатором были максимальные уровни и расходы воды на некоторых реках республики (Рисунок 4.5) для которых также были рассчитаны различные модели и их характеристики, которые приведены в Таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Характеристики нестационарных моделей максимальных в году уровней и расходов воды

Код		$\Delta_{тр}$	$\Delta_{ступ}$	$F_{тр}$	$F_{ступ}$	Год нач	Год кон,	n	R
Максимальные в году уровни воды									
1018	р. Колыма – п. Зырянка	0,9	2,7	1,02	1,06	1938	2014	77	-0,13
1367	р. Березовка – с. Березовка	0,3	1,3	1,01	1,03	1963	2014	52	0,07
1801	р. Колыма – г. Среднеколымск	0,3	1,7	1,01	1,04	1927	2014	86	-0,08
1802	р. Колыма – с. Колымское	0	0,8	1	1,02	1965	2014	50	0,01
1805	р. Колыма – п. Черский	0,6	1,7	1,01	1,04	1960	2014	48	-0,11
3029	р. Лена- п. Крестовский	4	6,7	1,09	1,15	1950	2013	64	0,28
3030	р. Лена- г. Ленск	0,8	7,6	1,02	1,17	1962	2014	53	0,12
3035	р. Лена- г. Олёкминск	1,9	7,1	1,04	1,16	1950	2014	65	0,19
3036	р. Лена- п. Солянка	2,8	8,6	1,06	1,2	1950	2013	63	0,23
3405	р. Оленек – с. Оленек	0,9	2,8	1,02	1,06	1936	2013	77	0,14
3414	р. Яна – г. Верхоянск	0,1	3,6	1	1,08	1926	2013	82	0,04
3416	р. Яна – п. Батагай	0	4,8	1	1,1	1954	2013	60	-0,01
3491	р. Индигирка – п. Усть-Мома	21,7	19,4	1,63	1,54	1965	2014	50	0,62
3801	р. Анабар – с. Саскылах	0,2	0,9	1	1,02	1936	2013	75	-0,06
3814	р. Оленек – с. Таймылыр	1,4	4,1	1,03	1,09	1950	2013	57	0,17
3816	р. Оленек – с. Усть-Оленек	2,4	4,3	1,05	1,09	1950	2013	62	0,22
3864	р. Яна – п. Нижнеянск	3,2	9,5	1,07	1,22	1970	2013	41	-0,25
3881	р. Алазея – с. Аргахта	2,6	7,6	1,05	1,17	1962	2013	50	0,22
3882	р. Алазея – с. Андрюшкино	0,9	3,8	1,02	1,08	1962	2013	38	-0,14
Максимальные в году расходы воды									
1367	р. Березовка – с. Березовка	1,2	1,8	1,02	1,04	1965	1999	33	0,15
1801	р. Колыма – г. Среднеколымск	0,4	2,4	1,01	1,05	1927	2014	75	-0,09
3029	р. Лена – п. Крестовский	1	2,9	1,02	1,06	1950	2014	65	0,14
3036	р. Лена – п. Солянка	3,9	6	1,08	1,13	1950	2014	65	0,28
3405	р. Оленек – с. Оленек	0,4	2,5	1,01	1,05	1936	2013	75	0,09
3414	р. Яна – г. Верхоянск	0,4	3,5	1,01	1,07	1936	2013	78	0,08
3801	р. Анабар – с. Саскылах	1,1	2,2	1,02	1,05	1954	2013	60	-0,15
3881	р. Алазея – с. Аргахта	6,1	8,8	1,13	1,2	1962	2013	50	0,34

Из анализа результатов, помещенных в Таблице 4.5, следует, что только в одном случае (р. Индигирка – п. Усть-Мома) нестационарная модель является эффективной и статистически значимой. Близкие к нестационарным моделям по Δ около 10% и статистически значимым R можно считать ряды максимальных уровней и расходов воды на р. Алазея – с. Аргахта, максимальных уровней на р. Яна – п. Нижнеянск (падение), р. Оленек – с. Усть-Оленек, максимальных расходов воды на р. Лена – п. Солянка. Временные графики всех этих рядов приведены на Рисунке 4.7.

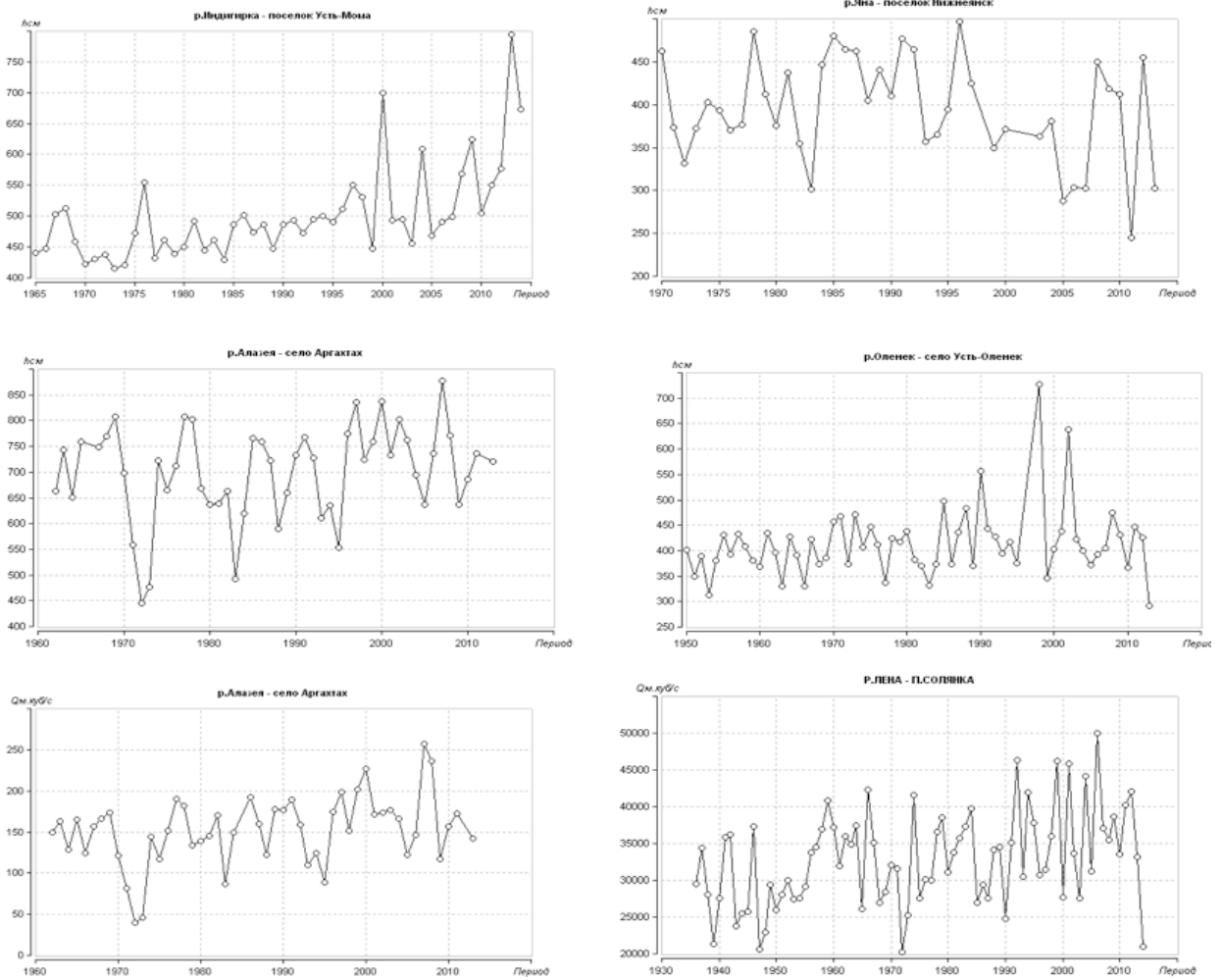


Рисунок 4.7 – Временные ряды нестационарных и близких к нестационарным рядам максимальных уровней и расходов воды

Из графиков, представленных на Рисунке 4.7, следует, что тренд роста максимальных уровней воды наиболее выражен на р. Индиگیرка – п. Усть-Мома ($\Delta_{тр} = 21.7\% > \Delta_{ступ} = 19.4\%$), а также на р. Алазея – с. Аргахта как для уровней, так и расходов воды. На р. Лена – п. Солянка колебания максимальных расходов воды имеют ступенчатый рост в 1990 г., а для р. Оленек – с. Усть-Оленек тренд подъема сменился в самые последние годы спадом, а на р. Яна – п. Нижнеянск произошло ступенчатое уменьшение уровня воды в 2000 г.

Несмотря на то, что температура мая является одной из самых нестационарных со средними по всем метеостанциям республики $\Delta_{тр} = 9,1\%$, $\Delta_{ступ} = 9,2\%$ и $R = 0,41$ и зона нестационарности охватывает почти половину территории, проявления этих температурных изменений в максимальных уровнях и расходах воды пока практически отсутствуют [73].

4.4 Выводы по климатическим индикаторам

В целом по результатам исследования климатических индикаторов можно сделать следующие выводы:

- дисперсия площадей пожаров в центральных и юго-восточных лесничествах Якутии возросла с конца 20-го, начала 21 вв., что также отразилось и на росте средних площадей пожаров;
- полученные эмпирические зависимости, которые можно использовать для сценарных оценок влияния будущих климатических изменений, свидетельствуют, что рост площадей пожаров прямо пропорционален росту температур и обратно пропорционален уменьшению осадков в месяцы теплого сезона года;
- температуры почвы выросли ступенчато в среднем на $1,0^{\circ}\text{C}$ в конце 1970-х–начале 1980-х и, главным образом, в центре и на юге республики, причем, чем ближе к поверхности, тем эти изменения больше, а на глубине 3,2 м температура стала превышать нулевые отметки, что является индикатором оттаивания мерзлоты;
- установлены эмпирические зависимости, связывающие температуры почвы на разных глубинах и с температурой воздуха, которые показывают рост температур почвы на $0,1-0,3^{\circ}\text{C}$ до конца 21 века, что приведет к оттаиванию мерзлоты на глубине 3,2 м;
- рост в гидрологическом отклике климата для рядов максимальных расходов и уровней воды практически пока не наблюдается за исключением отдельных случаев, что, однако, может быть связано и с локальными причинами, характерными для изменения уровня воды;
- оценка будущей выгоревшей площади на основе выбранных климатических моделей по температуре воздуха и атмосферным осадкам по сравнению с текущими значениями выгоревшей площади показала ее рост.

5. Разработка региональной климатической программы для Республики Саха (Якутия)

5.1 Анализ предполагаемых последствий влияния изменения климата для экономики, инфраструктуры и населения Республики Саха (Якутия)

Результаты многих исследований указывают на то, что воздействие изменения климата на природные процессы в северных районах нашей страны (включая и Якутию) будет проявляться главным образом в уменьшении продолжительности периода со снежным покровом, изменении гидрологического и ледового режима северных рек, повышении температуры и сокращении площади распространения многолетнемерзлых пород, увеличении глубины сезонного протаивания и смещения границ растительных зон. Некоторые из этих изменений могут оказать заметное влияние на социально-экономические условия северных регионов страны и привести к возникновению различных природных опасностей.

В рассматриваемом регионе, так и в других районах Крайнего Севера современные изменения климата способствовали усилению и возникновению ряда новых природных опасностей, которые можно назвать геокриологическими. Одной из обострившихся в последние годы проблем является деструктивное воздействие климатически обусловленной деградации вечной мерзлоты на инфраструктуру территорий. Изменения параметров природной среды, выходящие за рамки расчетного диапазона, могут вызвать повреждение объектов инфраструктуры, их частичное или полное разрушение, что может иметь опасные, в т.ч. катастрофические последствия [74].

Имеются многочисленные примеры нарушения целостности и разрушения жилых и производственных зданий из-за уменьшения несущей способности вечной мерзлоты и различных форм термокарста. В крупных северных городах с развитой инженерной инфраструктурой, таких как Якутск, эта проблема дополнительно осложняется негативным влиянием антропогенных и техногенных факторов, усиливающих деструктивное воздействие меняющегося климата. В Якутске за период с начала с 1970-х гг. более 300 зданий получили серьезные повреждения в результате просадок мерзлых почвогрунтов. По оценкам, полученным на кафедре инженерной геокриологии МГУ им. М.В. Ломоносова под руководством профессора Л.Н. Хрусталева, более четверти стандартных жилых пятиэтажных зданий в Якутске, Тикси, построенных за период с 1950-х по 1970-е гг., может стать непригодными к эксплуатации уже в ближайшие одно – два десятилетия. Более того, в условиях Якутска при увеличении среднегодовой температуры воздуха на 2°C несущая способность свайных фундаментов может сократиться до 50%.

Ведущей тенденцией на огромной территории Якутии является увеличение максимальных за год значений температур и глубины сезонного протаивания. Глубина сезонного

протаивания является важной характеристикой, определяющей выбор глубины закладки фундаментов всех технических сооружений, строящихся на многолетней мерзлоте [75].

Различные проявления изменений климата напрямую и опосредованно воздействуют на образ жизни и хозяйственные занятия коренных народов республики. Ведь традиционные формы хозяйствования сложились и функционируют в определенных природно-климатических условиях. На фоне сегодняшних социально-экономических трудностей новым вызовом для сельских жителей Якутии становятся ощутимые изменения в окружающей среде, в частности, в погодном режиме, состоянии водоемов, привычном ландшафте. Если раньше экологический конфликт носил больше антропогенный характер: «перегрузка» земель, истощение водоемов, скопление неутилизированного технического мусора, то сейчас селяне отмечают изменения, прежде всего, в температурном режиме сезонов, состоянии грунтов.

Экологический дисбаланс и его последствия в сельской местности стали предметом общественного внимания и научного изучения. В рамках инициативного проекта Института гуманитарных исследований и проблем малочисленных народов Севера СО РАН «Народы якутской Арктики в условиях глобальных климатических изменений: устойчивость, трансформации, адаптация» была изучена связь традиционных занятий и уклада жизни с состоянием окружающей среды на примере якутов-скотоводов и коневодов.

Уже предварительные итоги обследований показали, что жители сел обеспокоены природными изменениями. Наиболее часто упоминаются участвовавшие наводнения, таяния вечномерзлотного грунта, лесные пожары, нашествие шелкопряда.

Что касается социокультурных последствий, то, прежде всего, это настроение сельских жителей. Многие озабочены вероятностью изменений в традиционном образе жизни, социальной и экологической напряженности. При общем невысоком уровне жизни и заработной плате, уступающей общереспубликанской, сельские жители встревожены перспективами переселений, вынужденной миграции, ожидаемых стихийных бедствий. Опрошенные отмечали, что возросший уровень воды в водоемах из-за наводнений и дождей, оттаивание мерзлого слоя почвы создают реальные трудности [76; 77].

5.2 Оценка уязвимости экосистем Республики Саха (Якутия) на возможные климатические воздействия

Приведенные известным якутским климатологом М.К. Гавриловой данные свидетельствуют о том, что к середине нового века по всему Северу произойдет существенное повышение средних температур как года в целом, так и самого холодного и теплого месяцев. Соответственно произойдет смещение южной границы вечной мерзлоты на север.

Одновременно будет идти таяние льдов Северного Ледовитого океана, подтопление низменностей, подтаивание вечной мерзлоты, значительное увеличение озерности северных территорий, изменение характера почвообразовательного процесса. Это все будет сопровождаться значительным изменением видового состава растений и животных: произойдет расширение ареала многих видов в северном направлении, появятся новые виды-вселенцы, ранее распространенные в более южных регионах, некоторые из них дадут вспышки массового размножения. Отдельные местные виды будут вытесняться более приспособленными пришельцами, что в свою очередь приведет к изменению структуры и функционирования ныне существующих экосистем.

Многие виды животных и растений проникли на территорию республики именно в последние десятилетия, вероятно, в связи с наблюдаемым потеплением климата. Это подтверждается и наблюдаемым в это время расширением ареала многих ранее обитавших в регионе видов, что о чем говорят работы ряда якутских ученых.

С изменениями климата могут быть связаны и вспышки численности вредителей сельского и лесного хозяйства, в первую очередь, насекомых и мышевидных грызунов. Последние, являющиеся также хранителями и переносчиками возбудителей разных инфекционных и паразитарных заболеваний (туляремия, лептоспирозы, альвеококкоз, эхинококкоз и др.), в периоды высокой активности способствуют активизации очагов природно-очаговых заболеваний. Также возможному появлению очагов новых инфекций может способствовать расширение ареала многих перелетных птиц, среди которых имеются переносчики возбудителей инфекций.

При изменении климата в сторону потепления в лесном хозяйстве, на фоне улучшения произрастания лесных формаций, могут возникать благоприятные параметры для роста и размножения различных насекомых-вредителей, что приводит к возникновению значительных очагов болезней леса. С этим, вполне возможно, связано появление в якутских лесах в XX в. сибирского шелкопряда, ранее не обнаруживаемого на территории республики, дальнейшая массовая вспышка которого привела к огромному урону для лесов Якутии. Массовое размножение его происходило довольно регулярно во многих улусах Южной и Центральной Якутии. На данный момент сибирский шелкопряд активно расширяет свой ареал в западном и северном направлениях.

Значительные термокарстовые процессы будут проявляться по всему Северу. Они будут связаны с таянием ледового комплекса многолетнемерзлых пород, широко распространенных как в лесной, так и в тундровой зонах. Высвобождение при этом огромного количества воды наряду с таянием льдов Северного Ледовитого океана и ледников в горных районах приведет к

развитию паводков и наводнений, образованию большого количества новых озер. Может измениться характер и направление почвообразовательного процесса [26].

5.3 Разработка региональных стратегий смягчения последствий и адаптации к изменениям климата экономики, инфраструктуры и населения Республики Саха (Якутия)

В предыдущих главах диссертационного исследования была представлена оценка будущих изменений климата Якутии по двум ключевым метеопараметрам – температуре воздуха и атмосферным осадкам, которая показала рост осадков, и то, что температура будет повышаться сильнее в холодный период года (зима), рост весенних, летних и осенних температур будет существенно ниже (ниже зимних практически в два раза). Исходя из этого катастрофических последствий изменения климата ожидать не следует, но определенные климатические риски существуют, поэтому уже сейчас необходимо начать принимать превентивные меры и усиливать научные исследования в области оценки современных изменений климата и смежных с ней областях для обеспечения дальнейшего устойчивого развития региона.

Здоровье населения: оценивая влияние современного изменения климата на здоровье можно выделить три главных фактора.

Первый – это прямое воздействие связано с изменением температурного режима. Оно может быть позитивным в результате улучшения тепловой комфортности проживания в холодные сезоны года. Но при этом одновременно оно может быть и крайне негативным и примером являются участившиеся волны жары в летний период, нарушающие здоровье людей и приводящие к дополнительной смертности.

К косвенному, иначе опосредованному негативному, воздействию относится снижение качества воздуха, прежде всего из-за поступления в атмосферу продуктов горения при участившихся ныне лесных пожарах, интенсивность которых устрашающе растет в последние десятилетия.

Третий фактор, является также опосредованным – это влияние климата на эпидемиологическую обстановку. Для Якутии этот фактор является особенно важным, учитывая описанные ранее особенности эпидемиологической обстановки региона, связанные с повышением заболеваемости клещевым энцефалитом.

В целом можно выделить несколько основных направлений принятия адаптационных мер. Во-первых, планы усиления эпидемиологического надзора за климатозависимыми инфекционными заболеваниями и внедрение соответствующих мер профилактики, включая следующие меры: усиление общего эпидемиологического надзора, своевременную вакцинацию, разработку рекомендаций и планов действий по защите населения от последствий чрезвычайных

ситуаций, связанных с изменениями климата (природные катаклизмы, экстремальные погодные условия и вспышки инфекционных заболеваний).

Во-вторых, это расширение фундаментальных и прикладных научных исследований по влиянию региональных климатических изменений на здоровье населения, в том числе по оценке: воздействия потепления климата на экологию возбудителей и эпидемический процесс инфекционных и паразитарных заболеваний, воздействия климатических изменений на увеличение поступления в окружающую среду различных загрязняющих веществ, инфицированности животных, рыб, птиц, используемых в пищу или находящихся в контакте с человеком.

Строительство, наземный транспорт и топливно-энергетический комплекс: к наиболее заметным последствиям происходящего потепления климата относится изменение характеристик отопительного периода.

Наземная транспортная инфраструктура испытывает преимущественно негативное воздействие происходящих изменений климата. Наблюдается ускоренное разрушение автодорог и других объектов, увеличиваются эксплуатационные расходы, в том числе для обеспечения безопасности движения.

Особая актуальность принятия мер по адаптации к изменениям климата принадлежит **строительной индустрии**. Это обусловлено тем, что именно в строительной индустрии создаются объекты, рассчитанные на длительный период эксплуатации (жилые и общественные здания, магистральные газо- и нефтепроводы, дороги и др.).

При проектировании зданий и сооружений в условиях меняющегося климата в Якутии необходимо изменять в первую очередь принципы строительного проектирования. В условиях меняющегося климата в республике основной мерой энергосбережения, которая должна быть реализована является уменьшение потребления энергии на отопление.

Информационной основой адаптации строительной отрасли к изменениям климата должны являться нормативные и регламентирующие документы (строительные нормы и правила (СНиПы)), которые должны быть приведены в соответствие с учетом данных наблюдений за последние десятилетия.

Первоочередными адаптационными мерами, касающимися влияния изменения климата на наземный транспорт в рассматриваемом регионе, будут:

- учет влияния деградации вечной мерзлоты на устойчивость работы любых, в том числе железнодорожных, транспортных магистралей и принятие технических решений по снижению риска данного влияния;
- учет влияния изменения колебаний температурно-влажностных, ветровых и других погодно-климатических характеристик на физическое состояние дорог и транспортных

средств и принятие организационных, технических и медицинских мер по снижению риска данного воздействия.

Для Якутии одну наибольшую обеспокоенность вызывает уменьшение **несущей способности многолетней мерзлоты**. По прогнозным оценкам изменения вечной мерзлоты будут проявляться прежде всего в увеличении ее температуры и глубины сезонного протаивания, о чем говорилось ранее. Наибольшую опасность здесь представляет возможное повреждение фундаментов домов и сооружений на вечной мерзлоте за счет уменьшения ее несущей способности. Это создает угрозу разрушения объектов инфраструктуры, поскольку коэффициент запаса при строительстве в России, как правило, не превышает 1.6.

На Рисунке 5.1 представлена карта индекса геокриологической опасности, составленная с использованием перспективной оценки климата середины XXI в., полученной с помощью модели HadCM3. На ней показаны области с разной вероятностью деструктивных геоморфологических процессов.

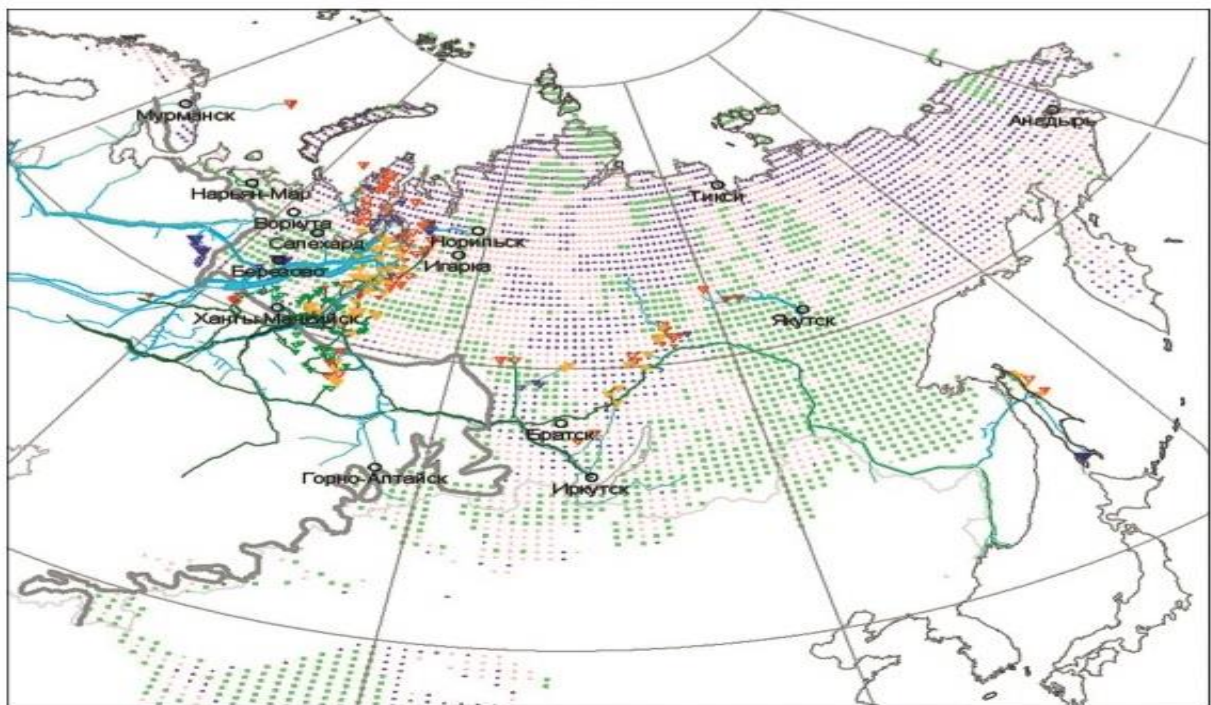


Рисунок 5.1 – Индекс геокриологической опасности для объектов на многолетней мерзлоте

На Рисунке 5.1 диапазон значений индекса геокриологической опасности разбит на три категории, к которым отнесены области с малой (зеленая точечная заливка), средней (светло-желтая) и большой (сиреневая) вероятностью развития деструктивных геоморфологических процессов, связанных с деградацией многолетней мерзлоты. Оценки получены на основе данных расчета климата середины XXI в. с глобальной климатической моделью HadCM3.

Как мы видим территория республики относится к зоне со значительной вероятностью развития криогенных процессов и соответственно принятие адаптационных мер к криогенным опасностям необходимо уже сейчас. Основным способ адаптации сооружений в данной северной области распространения вечной мерзлоты – это термостабилизация многолетней мерзлоты с применением технических средств, таких как установка термосифонов, обустройство вентиляционных каналов и подполий, усиление фундаментов посредством установки дополнительных свай. Также необходимо акцентировать внимание и на организацию мониторинга состояния фундаментов зданий с целью своевременного обнаружения их деформации и принятия мер по стабилизации фундаментов.

В перспективе к середине XXI в. экстремальность осадков в летний период на Дальнем Востоке (включая и Якутию) может увеличиться, в связи с чем возрастут частота и высота **дождевых и снегодождевых паводков**. Мерами адаптации могут служить строительство и реконструкция защитных сооружений, противопаводковых водохранилищ, создание противопаводковых емкостей на поймах, переселение людей с опасных участков на безопасные территории, в другие населенные пункты или регионы. В результате увеличения межгодовой изменчивости стока, особенно сезонного, возможны как аномально многоводные, так и аномально маловодные годы, и сезоны. Резервирование воды в водохранилищах, переброска стока из других бассейнов, создание альтернативных источников водоснабжения, снижение потерь воды при транспортировке, внедрение оборотных технологий водопотребления в промышленности могут рассматриваться как возможные меры адаптации.

Для кардинального улучшения ситуации с катастрофическими наводнениями необходимо создание бассейновых систем прогнозирования, предупреждения и защиты от наводнений и упорядочение землепользования в зоне риска наводнений на основе надежной оценки зон затопления, уязвимости и риска.

В последние годы наибольшую опасность для устойчивого развития **лесного хозяйства** республики представляют усилившиеся и увеличившие свою частоту лесные пожары, информация по которым приводилась в предыдущем разделе. Долговременное стояние аномально высоких температур и продолжительное отсутствие осадков или их недостаточное количество за летний сезон породили огромную проблему для лесного хозяйства Якутии. Важно отметить, что болезни и вредные насекомые наиболее эффективно поражают лес, когда он ослаблен неблагоприятными экстремальными условиями погоды. Так, в условиях экстремального сценария RCP8.5 антропогенного воздействия на климатическую систему в Восточной Сибири, включая Якутию к концу XXI в. ожидается увеличение пожароопасного периода на 20–29 суток, а на некоторых участках – на 30–50 суток (Рисунок 5.2). При умеренном сценарии RCP4.5 воздействия на климат ожидается увеличение пожароопасного периода на 0–

19 суток. Для ослабления ожидаемых негативных последствий изменения климата необходимы более совершенные методы и технологии мониторинга и достоверного прогноза, и эффективной ликвидации очагов пожаров, болезней и вредных насекомых.

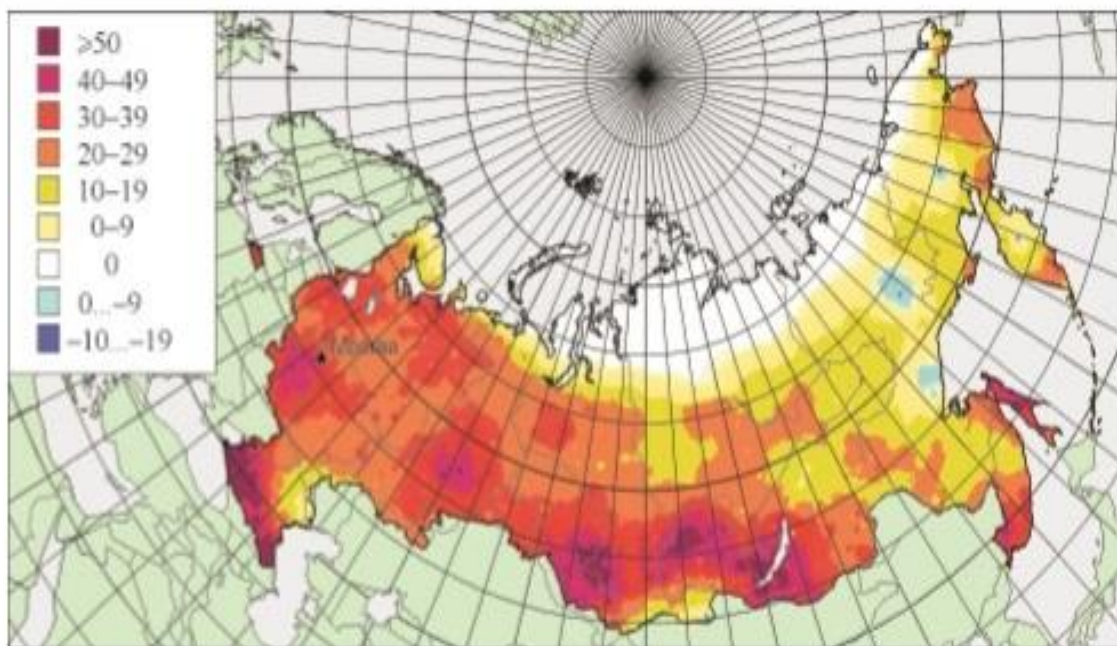


Рисунок 5.2 – Перспективная оценка изменения среднего числа пожароопасных суток в году (май-сентябрь) за 2080–2099-е гг. по сравнению с 1981–2000-и гг.

Среди основных мероприятий по адаптации лесного хозяйства республики к изменению климата можно выделить следующие:

- системный анализ нынешних и будущих региональных пожарных режимов и требований к рациональной системе охраны лесов от пожаров;
- разработку новой доктрины охраны лесов от пожаров;
- разработку и внедрение стратегии предотвращения широкомасштабных нарушений в лесах, в т.ч. адаптацию структуры лесных ландшафтов к будущему климату;
- внедрение эффективной системы лесного мониторинга;
- разработку нового и усовершенствование существующего законодательства и институциональных структур лесоправления, ориентированных на вызовы меняющегося климата;
- целесообразную международную кооперацию.

И, наконец, **отрасль жилищно-коммунального хозяйства (далее ЖКХ)**. С целью адаптации к изменениям климата в сфере ЖКХ необходимо безотлагательно внести коррективы в нормативные документы СНиП, государственные стандарты, а также технические регламенты. В частности, требует срочного пересмотра глава СНиП «Строительная климатология», к которой

нормативные квантили продолжительности и температуры отопительного периода должны быть заменены с учетом уже происходящего сокращения его продолжительности в связи с потеплением климата.

Перечень мер по адаптации к проявлениям современного изменения климата для Республики Саха приведен в Таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Основные меры адаптации к современным изменениям климата для ключевых отраслей экономики Республики Саха (Якутия)

Отрасль экономики	Климатические факторы, оказывающие воздействие / характер воздействия		Климатические индикаторы, оказывающие воздействие	Меры по адаптации
	Температура	Осадки		
Сельское хозяйство	Рост летних температур / благоприятное	Рост / Снижение – зависит от ситуации	Рост температуры почвы – раннее начало вегетационного периода / благоприятное	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Развитие сельского хозяйства. ✓ Расширение посевных площадей в отдельных районах (Южная Якутия).
Лесное хозяйство	Рост летних температур / неблагоприятное – увеличение риска пожаров; увеличение продолжительности пожароопасного сезона	Рост / Снижение – зависит от ситуации: <ul style="list-style-type: none"> - рост – снижение риска пожаров; - падение – возрастание риска лесных пожаров в Центральной и Западной Якутии, которые уже сейчас являются областью высокого риска пожаров. 	Небольшой прирост площади лесных пожаров в будущей перспективе	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Реализация комплексной программы по охране лесов, обеспечение повышения пожарной безопасности в лесах и совершенствование дистанционного оперативного мониторинга лесов. ✓ Тесное сотрудничество с Гидрометслужбой для прогнозирования метеорологических условий пожароопасного сезона с фокусом на уязвимые районы (юг, запад и центр Якутии).
Здравоохранение	Рост / Снижение – зависит от ситуации (экстремальные метеоявления / неблагоприятное)	Рост / Снижение – зависит от ситуации (экстремальные метеоявления / неблагоприятное)	Риск здоровью населения во время пожароопасных сезонов (смог пожаров) и паводков (угроза затопления жилых территорий)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Принятие планов по укреплению эпидемиологического надзора за чувствительными к климату инфекционными заболеваниями и внедрение соответствующих мер профилактики и т.п.
Строительный сектор	Рост среднегодовых температур / неблагоприятное воздействие: следствием может быть протаивание вечной мерзлоты и угроза устойчивости зданий и конструкций	Требуется более детальных исследований с привлечением компетентных специалистов в области строительства.	Рост температуры почвы / неблагоприятное воздействие Согласно проведенным расчетам в рамках данного диссертационного исследования – произойдет рост температур почв в Южной Якутии	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Принятие новых технических регламентов о безопасности зданий и сооружений, которые требуют, чтобы в технической проектной документации дополнительно должны быть указаны параметры, характеризующие устойчивость к неблагоприятным воздействиям климатических факторов. ✓ разработка мер, направленных на минимизацию рисков снижения надежности и долговечности зданий, сооружений, транспортных систем и инфраструктуры, расположенных в зоне вечной мерзлоты.

Продолжение Таблицы 5.1

Гидроэнергетика	Рост весенних температур / неблагоприятное – возрастание риска паводков	Рост твердых осадков / рост осадков в целом / неблагоприятное – возрастание риска паводков	Пока не наблюдается изменение индикатора – характеристик речного стока, но в будущем за счет воздействия климатического фактора – возможен рост риска весенних паводков	✓ Противопаводковый мониторинг. ✓ Раннее прогнозирование паводков. ✓ Высокое качество прогноза метеоусловий, благоприятствующих паводковой обстановке.
-----------------	---	--	---	--

5.4 Макет Климатической программы для Республики Саха (Якутия)

В нашей стране пока не существует единой государственной стратегии в области разработки адаптационных стратегий к проявлениям современного изменения климата. Однако, учитывая существующие климатические тенденции, особенно ее северных территорий, необходимо уже сейчас переходить к практическим действиям. При этом следует учитывать, что разработка подобных стратегий в нашей стране потребует индивидуального подхода к каждой отдельной отрасли экономики и каждому отдельному региону с учетом его природных и социально-экономических особенностей.

При этом на данный момент наиболее проблематичным при разработке адаптационных стратегий являются оценки будущих проекций норм осадков. Следствием этого является невозможность достаточно адекватного прогнозирования таких процессов, как эволюция мерзлоты, что особенно существенно для Якутии, расположенной целиком в зоне распространения вечной мерзлоты, и динамики стока. Другой, не менее трудной проблемой является прогнозирование изменений компонентов природной среды (почв, лесов, подземных вод и т.п.) вследствие реализации тех или иных сценариев изменения климата. Следует сразу указать тот факт, что экспертные оценки подобных изменений недостаточно точны и определены. Более того, модели, увязывающие в единый комплекс прогнозирование собственно климата и изменений природной среды, дают весьма существенные погрешности.

Основные подходы к подготовке адаптационных мер приводятся в руководстве МГЭИК по проведению оценок воздействия изменения климата и адаптации (IPCC Technical Guidelines for Assessing Climate Change Impacts, 1994 г.) [13]. Согласно этому Руководству, проведение таких оценок следует производить в несколько этапов, характеризующихся следующим:

- определение проблемы (постановка целей оценки, определение района и факторов воздействия, выбор временных границ изучения, определение необходимых исходных данных для анализа и общего контекста изучаемой проблемы);

- выбор метода (основные рекомендуемые методы – метод эксперимента, метод прогноза предполагаемых воздействий изменения климата, метод моделирования (биофизические, экономические и интегрированные совместные модели), метод аналогов (метод исторических аналогов – по событиям и тенденциям, метод региональных аналогов для оценки настоящего и будущего климата));
- тестирование метода (оценка наличия доступной информации и ее качества и достоверности, оценка предварительных прогнозных сценариев, географическое районирование, проведение тематических исследований, изучение климатических аналогов);
- выбор климатического сценария (оценка текущего состояния климата, определение временных границ прогноза, прогноз тенденций состояния окружающей среды и экономического развития в отсутствие влияния фактора изменения климата, моделирование будущих климатических изменений, подобные оценки, но уже включая во внимание климатический фактор);
- оценка биофизических и социально-экономических последствий (количественная оценка, выбор индикаторов, оценка соответствия стандартам, прогноз будущих затрат и выгод, географический анализ и выявление неопределенностей, включая анализ уязвимых зон и анализ возможных рисков);
- оценка адаптивной стратегии (определение целей, указание на важность последствий изменения климата, определение адаптационных мер, оценка неопределенностей, формулирование и количественное измерение альтернативных стратегий, разработка рекомендуемых адаптационных мер).

При этом необходимо заметить, что не существует строгого официально задокументированного алгоритма по разработке адаптивных климатических стратегий. Для разработки климатической программы для Якутии наибольший практический интерес представляет опыт северных стран, имеющих схожий суровый климат, а также экономику и инфраструктуру, построенную на вечной мерзлоте. В разработке климатической программы для региона исследования были использованы следующие региональные планы и программы адаптации климатическим изменениям на примере Канады:

- Municipal Climate Change Action Plan Guidebook. Developing Climate Change Capacity at the Municipal Level in Nova Scotia, Canada;
- Changing Climate, Changing Communities. Guide and Workbook for Municipal Climate Change Adaptation, ICLEI Project, Canada;
- Dawson Climate Change Adaptation Plan. Community Adaptation Project, Dawson Adaptation Project, Yukon, Canada [78; 79; 80].

Структура климатической программы для Якутии должна будет включать в себя следующие разделы.

Первый раздел – определение проблем, возникающих вследствие изменения климата, и предварительная оценка вызываемого ею ущерба. Этот раздел представляет собой информацию о значительных проблемах, возникающих в связи с изменением климата и возможных опасностях, затрагивающих регион исследования и объяснение того, почему они являются для данного региона важными, это:

- описание проблем и опасностей, появившихся или усилившихся вследствие изменения климата в регионе исследования;
- характеристика уровня подготовленности, которая характеризует регион исследования относительно изучаемой проблемы и сопряженных с ней опасностей;
- описание имеющихся и возможных будущих проблем или опасностей, которые могли бы вызвать серьезные последствия в будущем, которые потребуют принятия мер со стороны руководства и всех заинтересованных лиц данного региона;
- анализ того, как возникающие проблемы и опасности могли бы затронуть будущее региона;
- построение географических проекций, карт зон уязвимости: построение карт, которые географически иллюстрируют, где встречаются, опасности, сопряженные с изменением климата, где они произойдут в будущем и где они уже происходили в прошлом;
- анализ потенциального положительного эффекта вследствие изменения климата, выгод, которые извлекает регион, если это применимо.

Второй раздел – определение территорий, на которые будут оказывать воздействие проблемы и опасности, сопряженные с изменением климата:

- описание территорий, где проблемы, связанные (вызванные) с изменением климата происходили в прошлом и, вероятно, произойдут снова;
- информация, описывающая, где в пределах региона исследования возможны опасности, сопряженные с изменением климата, как они, вероятно, произойдут и объяснение как были определены данные локации;
- анализ уровня степени воздействия уязвимых территорий (умеренная, высокая или низкая);
- картографические проекции, показывающие объекты экономики и инфраструктуры, расположенные в уязвимой зоне.

Третий раздел – воздействие на инфраструктуру/ экономику региона:

- описание ключевых средств и инфраструктуры, на которые ожидается воздействие проблем и опасностей, сопряженных с изменением климата;

- наложение карт, которое указывает, попадают ли эти средства в области, определенные во втором этапе, оценка сопряженных рисков;
- секция, описывающая конкретные проблемы, которые затронут инфраструктуру региона.

Четвертый раздел – экономическая оценка, которая представляет собой оценку потенциального воздействия изменения климата на регион в целом:

- информация относительно того, как изменение климата может потенциально повлиять на местные и региональные экономические системы, выделение отраслей экономики, которые могут быть особенно уязвимы;
- оценка потенциальных угроз местной экономике;
- описание любых областей в пределах местной экономики, где изменение климата, может принести положительный экономический эффект.

Пятый раздел – расстановка приоритетов для адаптации:

- уровень приоритета, назначенного для каждой проблемы (высокий, средний, низкий);
- информация о диапазоне возможных действий, которые могут рассматриваться для обращения к приоритетным вопросам;
- список задач или дополнительной информации, необходимой, чтобы развить более комплексный анализ и понимание приоритетных вопросов;
- обсуждение потенциальных подходов планирования или инструментов, которые могли бы использоваться, чтобы облегчить адаптацию.

В республиканской климатической программе адаптация будет рассматриваться применительно к каждой из ключевых для Якутии климатически обусловленных проблем, которые включают:

- таяние вечной мерзлоты,
- лесные пожары;
- весеннее половодье;
- влияние на здоровье и благосостояние населения республики,
- изменение видового состава растений и животных, расширение ареала многих видов в северном направлении;
- воздействие на экономику и инфраструктуру.

Таким образом, проанализировав опыт международный опыт и опираясь на существующие стандарты МГЭИК была создана следующая структура создания климатической программы для Якутии.

Введение «Анализ настоящих и будущих изменений климата на территории Якутии».

Глава 1 «Определение проблем, возникающих вследствие изменения климата, и предварительная оценка вызываемого ею ущерба»:

1.1 Лесные пожары.

1.2 Весенние паводки.

1.3 Таяние вечной мерзлоты и ее воздействие на устойчивость инфраструктуры.

Глава 2 «Определение территорий, на которые будут оказывать воздействие проблемы и опасности, сопряженные с изменением климата»:

2.1 Лесные пожары – Центральные и Западные районы республики.

2.2 Весенние паводки - Центральные, Южные и Западные районы республики (Северные районы – паводки редкой повторяемости).

2.3 Таяние вечной мерзлоты и ее воздействие на устойчивость инфраструктуры – вся территория республики.

2.4 Здоровоохранение – вся территория республики.

Глава 3 «Воздействие на инфраструктуру/ ключевые отрасли хозяйства региона»:

3.1 Лесное хозяйство.

3.2 Здоровоохранение.

3.3 Строительство и наземный транспорт.

3.4 Гидроэнергетика.

Глава 4 «Экономическая оценка, которая представляет собой оценку потенциального воздействия изменения климата на республику в целом»:

4.1 Для реализации в жизнь климатической программы для Якутии планируется привлечь отраслевых специалистов и экономистов для создания подхода экономической оценки принятия/непринятия адаптационных мер к проявлениям современного изменения климата на территории Якутии.

Глава 5 «Приоритетные адаптационные меры».

Заключение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное диссертационное исследование было посвящено комплексному исследованию климатической «триады», которая включала в себя:

- оценку современных и будущих изменений регионального климата;
- оценку уязвимости климатических индикаторов к изменениям;
- разработку мер для смягчения последствий изменения климата на примере крупнейшего северного региона России, Республики Саха (Якутия).

В ходе проведения работы были получены следующие важнейшие результаты и положения:

1. На основе проведенного анализа однородности, стационарности, восстановления пропусков и увеличения продолжительности рядов наблюдений за температурой воздуха и атмосферными осадками сформирована региональная база данных для климатического моделирования.
2. На основе моделирования временных рядов установлены пространственно-временные закономерности проявления современных климатических изменений на территории Республики Саха (Якутия), состоящие в том, что вклад нестационарности возрос в последнее время и весенне-летний максимум нестационарности по температуре наблюдается на юге, а осенне-зимний – на северо-востоке. В свою очередь, осадки являются более стационарными, чем температура, и их нестационарность проявляется в основном в месяцы холодного периода года (декабрь-февраль)
3. Установлено, что наиболее подходящей климатической моделью для территории Якутии является модель HadGEM2, а наибольший рост температур следует ожидать зимой до 4–6°C в последней трети XXI века по сценарию RCP4.5 причем на севере, а в остальные периоды года – до 2–3°C. Закономерности будущего потепления по территории состоят в том, что в южной, центральной и восточной частях республики следует ожидать меньшего потепления, чем в северной и западной примерно на 4–8°C зимой и на 2–3°C в теплый период года. В целом по всей территории Якутии в будущем произойдет рост осадков: зимой и осенью в пределах от 10 до 60%, а в летний период на некоторых станциях количество осадков увеличится в два раза, хотя надежность перспективных оценок осадков много ниже, чем температуры воздуха.
4. Анализ динамики климатических индикаторов показал, что дисперсия площадей лесных пожаров возросла и в будущем средние площади пожаров увеличатся еще на 1–2%; температуры почвы также растут и еще могут увеличиться на 0,1–0,3°C, что приведет к оттаиванию вечной мерзлоты на глубинах ниже 3 м, а характеристики максимального речного стока пока неизменны.
5. Разработаны региональные меры смягчения последствий и адаптации к изменениям климата для экономики, инфраструктуры и населения Республики Саха (Якутия).

6. Сформирован макет региональной климатической программы для Республики Саха (Якутия), в которой учтены изменения климата и их воздействия на климатические индикаторы и даны стратегии по смягчению последствий изменения и адаптации к ним.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. О Республике Саха (Якутия). Официальный сайт Правительства Республики Саха (Якутия). – [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа – <https://www.sakha.gov.ru/o-respublike-saha-yakutiya/-o-respublike>
2. О регионе. Официальный сайт Торгово-промышленной палаты Республики Саха (Якутия). – [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа – <http://sakha.tpprf.ru/ru/region/>
3. Якутия. Серия «Природные условия и естественные ресурсы СССР». – М. : Изд-во «Наука», 1965. – 468 с.
4. Социально-экономическое развитие Республики Саха (Якутия). Информационный портал «ГОССМИ.РУ». – [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа – http://gossmi.ru/page/gos1_834.htm
5. Республика Саха (Якутия). Информационный меморандум. – Обзор. Подготовлен БК «Регион». – М., 2013. – 45 с.
6. Схема комплексного развития производительных сил, транспорта и энергетики Республики САХА (Якутия) до 2020 года. Сводный том. Утверждена Постановлением Правительства Республики Саха (Якутия) №411 от 06.09.2006 г.
7. Краснов, А. М. Политика в области глобальных климатических изменений: теоретико-экономический анализ: автореф. дис. канд. экон. наук : 08.00.14 / Краснов Алексей Михайлович, Спб., 2010 г. – 19 с.
8. Всемирная программа исследований климата: достижения, виды деятельности и задачи/ А Дж. Басалачи, Гассем Р. Асрем // Бюллетень ВМО. – 2009. – №58 (3). – 223 с.
9. Парниковые газы – глобальный экологический ресурс: справ. пособие под ред. Кокорина, А.О. – М., 2004. – 136 с.
10. Доклад «Рамочная конвенция ООН об изменении климата. Первые десять лет». Подготовлен информационной службой Секретариата РКИК, РКИК ООН, 2004. – 99 с.
11. Глобальное изменение климата и экономическое развитие: учеб. пособие для курса экономики природопользования высших специальных учебных заведений / С. Н. Бобылев, И. Г. Грицевич. – М. : ЮНЕП, WWF Россия. – 2005. – 64 с.
12. Пятое национальное сообщение Российской Федерации, представленное в соответствии со статьями 4 и 12 Рамочной Конвенции ООН об изменении климата и статьей 7 Киотского протокола, Министерство природных ресурсов Российской Федерации и Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. – М., 2010. – 196 с.
13. Комплексные климатические стратегии для устойчивого развития регионов Российской Арктики в условиях изменения климата (Модельный пример Мурманской области). – М. :

- Программа развития ООН в России, Российский региональный экологический центр, 2009. – 88 с.
14. Распоряжение Правительства РФ от 25.04.2011 №730-р (в ред. от 31.01.2017) «Об утверждении комплексного плана реализации Климатической доктрины Российской Федерации на период до 2020 года».
15. Панин, Г. Н., Выручалкина, Т. Ю., Соломонова, В. И. Региональные климатические изменения в Северном полушарии и их взаимосвязь с циркуляционными индексами// Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – Том 23. – 2010. – с.92–108.
16. Изменение климата. Учебно-методические материалы для школьников и студентов субарктических регионов России/ Грицевич И. Г., Кокорини А. О., Подгорный И. И., WWF России, 2007. – 56 с.
17. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме/ Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). – М., 2014. – 60 с.
18. Анализ изменения природно-климатических условий Якутии по начало следующего столетия// Природные условия осваиваемых регионов Сибири. – Якутск: ИМЗ СО АН СССР, 1987. – с.146–159.
19. Изменения климата и их последствия// География в Якутии: наука и образование. Материалы II Форума географов Якутии к 70-летию со дня рождения С. Е. Мостахова. – Якутск: Изд-во ЯГУ и Института повышения квалификации работников образования, 2005. – с.43– 46.
20. Дучков, А. Д., Деменко, Д. Ю., Балобаев, В. Т., Голованова, И. В., Дорофеева, С. П. Реконструкция палеоклиматических условий Урало-Сибирского региона в позднем плейстоцене и голоцене по геотермическим данным// Глобальные и региональные изменения климата и природной среды позднего кайнозоя в Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – с.405–443.
21. Варламов, С. П. Температурный режим грунтов мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии. – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2002. – 218 с.
22. Скачков, Ю. Б. О современной изменчивости атмосферных осадков в Центральной Якутии // Влияние климатических и экологических изменений на мерзлотные экосистемы. Труды Второй международной конференции «Роль мерзлотных экосистем ...» 12-17 августа 2002, Якутск. Якутск : ЯФ изд-ва СО РАН, 2003, с.189–194.
23. Скачков, Ю. Б. Тенденции современных изменений температуры воздуха в республике Саха (Якутия) Исследования ландшафтов криогенных областей// Вопросы географии Якутии. – Вып.9. Якутск : Изд-во ИМЗ СО РАН, 2005. – с.27–31;

24. Скачков, Ю. Б. Современная изменчивость климата Якутии// Девятое сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу: Материалы российской. конф./ Под ред. М.В. Кабанова. – Томск : изд. Аграф-Пресс, 2011. – с.66–68.
25. Гаврильев, П. П. Мерзлотно-экологические особенности таежных агроландшафтов Центральной Якутии. – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2001. – 196 с.
26. Обзор состояния и тенденция изменения климата Якутии/ Балобаев В. Т., Гаврилова М. К., Скачков Ю. Б., Гаврильев П. П. и др. – Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2003. – 52 с.
27. Fedorov, A. N., Konstantinov, P. Ya. Response of permafrost landscapes of Central Yakutia to current changes of climate, and anthropogenic impacts. *Geography and Natural Resources* 30, 2009. – pp.146–150.
28. Десяткин, Р. В., Десяткин, А. Р., Федоров, П. П. Температурный режим мерзлотно-таежных почв Центральной Якутии. *Криосфера Земли*. 2012. Том 16. Вып. 2., с.70–78.
29. Фёдоров, А. Н. «Спасская Падь»: Комплексные исследования мерзлотных ландшафтов. – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2006. – 210 с.
30. Григорьев, М. Н. Обзор современных изменений климата и природной среды в Республике Саха (Якутия). Якутск : Изд-во «Хамелеон», 2010. – 18 с.
31. Кириллина, К.С. Современные тенденции изменения климата Республики Саха (Якутия). Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета №30. Научно-теоретический журнал. – СПб. : РГГМУ, 2013. – 222 с., с.69–77.
32. Кириллина, К.С. Тенденции изменения климата Республики Саха (Якутия). Влияние изменений климата на природные процессы криолитозоны// Вопросы географии Якутии. Вып.11/ Ответственные редакторы А.Н. Федоров, Р.Н. Иванова. – Якутск: Издание «СМИК-Мастер», 2013. – 182 с. – 115–121.
33. Выпуск №563 Трудов Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. Под ред. Катцова В. М., Мелешко В. П. – Спб., 2011. – 324 с.
34. Обзор доклада Николаса Стерна «Экономика изменения климата». – Изд-е 2-ое, дополненное и переработанное / Кокорин А. О., Кураев С. Н., Юлкин М. А. WWF, Strategic Programme Fund (SPF). – М. : WWF России, 2009. – 60 с.
35. Национальный план действий Республики Таджикистан по смягчению последствий изменения климата. – Душанбе : Таджикглавгидромет. – 2003. – 264 с.
36. Седьмое национальное сообщение Российской Федерации представленное в соответствии со статьями 4 и 12 РКИК ООН и статьей 7 Киотского протокола.
37. Полярные регионы (Арктика и Антарктика). Изменение климата и его последствия. Перевод Глава 15 рабочей группы 2 Четвертого оценочного доклада МГЭИК (с.24–27).

38. Mogelgaard, K. What Next? Climate Adaptation After Paris. – [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа – <https://www.wilsoncenter.org/event/what-next-climate-adaptation-after-paris>
39. Mogelgaard, K. What Does the Paris Agreement Mean for Climate Resilience and Adaptation?. – [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа <http://www.wri.org/blog/2015/12/what-does-paris-agreement-mean-climate-resilience-and-adaptation>
40. Lesnikowski, A., Ford, J., Biesbroek, R. What Does the Paris Agreement Means for Adaptation?. *Climate Policy*. 2017. – 17: Vol.7, pp.825–831.
41. Ngwadla, X. and El-Bakri, S. 2016. The Global Goal for Adaptation under the Paris Agreement: Putting ideas into action. London, UK: Climate and Development Knowledge Network.
42. Nachmany M., Fankhauser, S., Davidova, J., Nick Kingsmill, Tucker Landesman, Hitomi Roppongi, Philip Schleifer, Joana Setzer, Amelia Sharman, C. Stolle Singleton, Jayaraj Sundaresan and Terry Townshend. 2015. The 2015 Global Climate Legislation Study - A Review of Climate Change Legislation in 99 Countries. London: GLOBE International and the Grantham Research Institute, London School of Economics.
43. Первый двухгодичный доклад Российской Федерации, представленный в соответствии с Решением 1/СР.16 Конференции Сторон Рамочной Конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата. Министерство природных ресурсов и экологии РФ, Росгидромет. – М. : 2014. – 27 с.
44. Первый оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Техническое резюме/ Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). – М., 2008. – 89 с.
45. Kokorin, A. Economic and environmental factors behind Russia’s climate policy development (2014); *International Research Journal*, Vol. 11-3 (30).
46. Climate change and natural disasters: A challenge for Russian policymakers. 1.10.2014. Roger Roffey. Swedish Defence Research Agency (FOI).
47. Chepurina, M. What’s behind Russia’s climate policy? Small steps towards an intrinsic interest, Working Papers N°03/12, IDDRI, Paris.
48. Sharmina, M., Anderson, K. and Bows-Larkin, A. (2013), Climate change re-gional review: Russia. *WIREs Clim Change*, 4: pp.373–396.
49. Сердитова, Н.Е., Кириллина, К.С. Обзор современного состояния и перспективных подходов к проблеме адаптации к изменению климата в Российской Федерации. *Вестник ТвГУ. Серия «География и экология»*. 2015. №2. – с. 22-32.
50. Лобанов, В. А. Практикум по климатологии. Ч.1. – СПб. : РГГМУ, 2011. – 145 с.
51. Рекомендации по статистическим методам анализа однородности пространственно-временных колебаний речного стока. ГГИ. — Л. : Гидрометеиздат, 1984. – 78 с.

52. Определение основных расчетных гидрологических характеристик: СП 33-101-2003. – М.: Госстрой России, 2004. – 73 с.
53. Лобанов, В. А., Лемешко, Н. А., Жильцова, Е. Л., Горлова, С. А., Ренева, С. А. Методы восстановления многолетних рядов температуры воздуха. // Сборник работ по гидрологии, 2004, № 27, с.54–68.
54. Лобанов, В. А., Лемешко, Н. А., Жильцова Е. Л., Горлова С. А., Ренева С. А. Восстановление многолетних рядов температуры воздуха на Европейской территории России. // Метеорология и гидрология, 2005, № 2, с.5–14.
55. Лобанов, В. А. Проявление современных изменений климата на территории Костромской области. – Кострома : ФГБУ «Костромской центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды», 2013. – 179 с.
56. Лобанов, В. А. Практикум по климатологии. Ч. 2. – СПб. : РГГМУ, 2012. – 180 с.
57. Бокс, Дж. Анализ временных рядов. – М. : Мир, 1974. – 406 с.
58. Закс, Л. Статистическое оценивание. – М. : Статистика, 1976. – 598 с.
59. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ. – М. : Статистика, 1973. – 392 с.
60. Малинин, В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. – СПб. : РГГМУ, 2008. – 407 с.
61. Лобанов, В. А. Определение зон климатического риска на территории России при современном изменении климата. – СПб. : РГГМУ, 2013. – 164 с.
62. Кириллина, К. С., Лобанов, В. А. Оценка современных климатических изменений температуры воздуха на территории Республики Саха (Якутия). Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета №38. Научно-теоретический журнал. – СПб. : РГГМУ, 2015. – 276 с., с.137–151.
63. Кириллина, К. С., Лобанов, В. А. Оценка современной изменчивости атмосферных осадков на территории Республики Саха (Якутия). Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета № 39. Научно-теоретический журнал. – СПб. : РГГМУ, 2015. – 250 с., с.74–86.
64. Официальный сайт ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова». Раздел «Изменения климата в России в 21 веке (модели CMIP 5)». – [Электронный ресурс]. – 2017. Режим доступа <http://voeikovmgo.ru/ru/izmenenie-klimata-v-rossii-v-xxi-veke?id=613>
65. Официальный сайт пятой фазы проекта по сравнению взаимосвязанных моделей Всемирной программы по изучению климата, раздел «Доступ к данным». – [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/data_portal.html

66. Кириллина, К. С., Лобанов, В. А., Сердитова, Н. Е. Оценка будущего климата Республики Саха (Якутия). Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета № 40. Научно-теоретический журнал. – СПб.: РГГМУ, 2015. – 298 с., с.113–126.
67. U.S. Environmental Protection Agency. 2014. Climate change indicators in the United States, 2014. Third edition. EPA 430-R-14-004.
68. Изменение климата, 2014 г. Последствия, адаптация и уязвимость. Часть А: Глобальные и секторальные аспекты. Часть В: Региональные аспекты. Вклад Рабочей группы II в подготовку Пятого оценочного доклада МГЭИК (англ.) – 1785 с.
69. Изменение климата, 2014 г. Смягчение воздействий на изменение климата. Вклад Рабочей группы III в подготовку Пятого оценочного доклада МГЭИК (англ.) – 1435 с.
70. Westerling, A. L., Bryant, B. P. 2008. Climate change and wildfire in California, *Climate change*, 87 (1), pp.231–249.
71. Kozlov, V. I., Mullayarov, V. A., Solovyev, V. S. Forest fires in Yakutia from thunderstorms, *Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2009. – 6 (2). – pp.388–393.
72. Васильев, М. С., Каримов, Р. Р. Исследование возможных причин возникновения лесных пожаров в Якутии по данным дистанционных наблюдений. В мире научных открытий, 2014. – №4 (52). – с.161–171
73. Лобанов, В. А., Кириллина, К. С. Отклик климатических индикаторов на современное потепление климата в Республике Саха (Якутия). Научный журнал «Географический вестник Пермского университета» – Пермь: 2017. – №4 (43). – с.112-122.
74. Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 г. и дальнейшую перспективу / Катцов В. М., Кобышева Н. В., Мелешко В. П. и др.; под ред. д.ф.-м.н. Катцова В. М., д.э.н., проф. Порфирьева Б. Н.; Федер.служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). – М. : Д'АРТ: Главная геофизическая обсерватория, 2011. – 252 с.
75. Шерстюков, А. Б. Изменения климата и их последствия в зоне многолетней мерзлоты России. – Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2009. – 127 с.
76. Боякова, С. И., Винокурова, Л. И., Игнатьева, В. Б., Филиппова, В. В. Якутия в условиях глобальных климатических изменений: уязвимость, риски, социальная адаптация. Северо-Восточный гуманитарный вестник. – 2010. – №1. – с.22–25.
77. Боякова, С. И., Винокурова, Л. И., Игнатьева, В. Б., Филиппова, В. В. Социальные последствия и адаптация населения Республики Саха (Якутия) к чрезвычайным ситуациям природного характера (по материалам социологических исследований 2009-2010 гг.). Северо-Восточный гуманитарный вестник. – 2011. – №2. – с.37–40.

78. Municipal Climate Change Action Plan Guidebook. Developing Climate Change Capacity at the Municipal Level in Nova Scotia, Canada.
79. Changing Climate, Changing Communities. Guide and Workbook for Municipal Climate Change Adaptation, ICLEI Project, Canada.
80. Dawson Climate Change Adaptation Plan. Community Adaptation Project, Dawson Adaptation Project, Yukon, Canada.