В.А. Лобанов, К.С. Кириллина

==========

Современные и будущие изменения климата Республики Саха (Якутия)

Санкт-Петербург
2019

Министерство образования и науки Российской Ф едерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРА ЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

В.А. Лобанов, К.С. Кириллина

СОВРЕМЕННЫЕ И БУДУЩИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

Монография

Санкт-Петербург

2019

УДК 551.51
ББК
Л68

Рецензент: А.Е. Шадурский, к-т геогр. наук, вед. специалист АО «АТОМПРОЕКТ» госкорпорации “Росатом”

Лобанов В.А., Кириллина К.С.
Современные и будущие изменения климата Республики Саха (Якутия). Монография – СПб.: РГГМУ, 2019. – 157 с.

В монографии рассматриваются современные и будущие климатические изменения температуры воздуха и осадков на территории Республики Саха (Якутия), а также таких климатических индикаторов, как площади и число лесных пожаров, температура почвы, максимальные расходы и уровни воды весеннего половодья, характеристики ледового режима рек. На основе анализа и моделирования многолетних рядов наблюдений по 96 метеостанциям республики получены пространственно-временные закономерности показателей климатических изменений и выбраны наиболее подходящие климатические модели, с помощью которых выбраны и рассмотрены проекции будущих изменений до конца 21 века. Дана оценка влияния изменений климата на отрасли экономики, экосистемы, инфраструктуры и население республики, а также рассмотрены региональные стратегии смягчения последствий этого воздействия. В результате сформирован макет климатической программы для Республики Саха (Якутия).

Предназначена специалистам гидрометеорологам, инженерам, аспирантам, магистрам и студентам.

Lobanov V.A., Kirillina K.S.
The modern and future climate changes in the Republic of Sakha (Yakutia). Monograph – St.Petersburg: ed. RSHU, 2019. – 158 pp.

The monograph examines modern and future climatic changes in air temperature and precipitation in the Republic of Sakha (Yakutia), as well as climate indicators such as the area and number of forest fires, soil temperature, maximum discharges and water levels of the snowmelt floods, characteristics of the ice regime of rivers. Based on the analysis and modeling of long-term time series of observations from 96 weather stations of the republic, spatial-temporal regular properties of climate change parameters were obtained and the most suitable climate models were selected, with the help of which projections of future changes were selected and considered until the end of the 21st century. Estimates of the impact of climate change on sectors of the economy, ecosystems, infrastructure and population of the republic are given, and regional mitigation strategies are considered. As a result, the structure of the layout of the climate program for the Republic of Sakha (Yakutia) was formed.

The book is intended for specialists in hydrometeorology, engineers, postgraduate students, masters and students.

© Лобанов В.А., Кириллина К.С. 2019
© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2019

ISBN 978-5-86813-472-2

СОДЕРЖАНИЕ

Введение…… …. 5
Глава 1. Методика исследований ……... 8
1.1 Краткая характеристика природно-климатических и социально-экономических особенностей Республики Саха (Якутия)…… ……... 8
1.2. Обзор организационной деятельности в рамках проблемы современного изменения климата ……..... 10
1.3. Краткий обзор современных изменений климата на территории России и Якутии ……..... 13
1.4. Обзор стратегий смягчения и адаптации к последствиям климатических изменений ……... 18
1.5. Методика исследований для формирования региональной климатической программы ……... 28
Глава 2. Оценка современных изменений климата на территории Республики Саха (Якутия) …… 31
2.1. Формирование и анализ качества региональной базы данных …… 31
2.2. Оценка климатических изменений температур воздуха и их пространственное обобщение ……. 49
2.3. Климатические изменения осадков и их пространственное обобщение …… ……... 62
2.4. Оценка устойчивости полученных изменений ……..... 70
Глава 3. Оценка будущих изменений климатических характеристик и их возможного воздействия на основные отрасли экономики Республики Саха (Якутия)……..... 74
3.1. Стратегия оценки возможных будущих изменений климатических характеристик на основе сценариев и моделей ….. 74
3.2. Выбор эффективной климатической модели для температуры воздуха …… 76
3.3. Полученные сценарные показатели климатических изменений температуры воздуха для территории Республики Саха (Якутия) и оценка надежности ……. 88
3.4. Выбор эффективной климатической модели и сценарные оценки для осадков ……..... 90
Глава 4. Примеры оценки динамики климатических индикаторов на территории Якутии …… 99

4.1. Динамика пожаров на территории Республики Саха (Якутия)…… ……... 100
4.2. Динамика температуры почвы на территории Республики Саха (Якутия)…… ……. 107
4.3. Динамика характеристик максимального стока на реках республики ……. 113
4.4. Динамика характеристик ледового режима рек…… …… 115
4.5. Выводы по климатическим индикаторам……. 127
Глава 5. Разработка региональной климат ической программы для Республики Саха (Якутия) ……. 128
5.1. Анализ предполагаемых последствий влияния изменения климата для экономики, инфраструктуры и населения Ре с-публики Саха (Якутия)…….. 128
5.2. Оценка уязвимости экосистем Республики С аха (Якутия) на возможные климатические воздействия …… 130
5.3. Разработка региональных стратегий смягчения последствий и адаптации к изменениям климата экономики, инфраструктуры и населения Республики Саха (Якутия) …… 132
5.4. Макет Климатической программы для Республики Саха (Якутия)…… ….. 139
Заключение…… …. 146
Литература…….. 151

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 проецируемым 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.

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, а в России наиболее известны публикации и научные доклады коллектива авторов Росгидромета. В Республике Саха (Якутия) наибольшее количество исследований в

области оценки современных тенденций изменения климата пр инадлежат Институту мерзлотоведения Сибирского отделения Ро сийской академии наук (далее СО РАН), социальны е же аспекты адаптации изучались Институтом гуманитарных исследований и проблем малочисленных народов севера СО РАН, но комплексных исследований по оценке современного и будущего климата ре спублики, вызываемых ими последствий для экономики, инфр аструктуры и населения Якутии еще не проводилось.

Данная монография посвящена разработке стратегии ада птации северного региона к изменению климата на примере кру пнейшего субъекта Российской Федерации – Республики Саха (Якутия), что включает в себя изучение целого ко мплекса про блем, связанных с проявлениями современного изменения климата в Якутии и среди них:

- анализ современных тенденций изменения климата респу блики и их временной дина мики;
- моделирование буду щего климата;
- проведение комплексной оценки ожидаемых воздействий клим атических изменений на экономическое развитие республики, эк осистемы и население республики на основе климатических инд икаторов;
- разработку конкретных предложений по созданию адаптацио нных стратегий для уязвимых секторов экономики р егиона.

Перечисленный комплекс проблем лежит в основе деятел ьности МГЭИК (Международной группы экспертов в изучении и з менений климата), который осуществляется ей по трем основным направлениям, представленных тремя рабочими группами:

- оценка современных и будущ их изменений климата:
- оценка чувствительности климатических индикаторов к измен ениям;
- разработка мер для смягчения последствий изменений климата.

Подобная «климатическая триада»: оценка изменений – оценка воздействий – адаптация, в данной монографии ре ализована на региональном уровне для республики Саха (Якутия). Ра сматриваемая методология лежит также и в русле реализации ра зработанной Росгидрометом и утвержденной Президентом Клим атической доктрины РФ (п.44: «Реализация политики в области

климата предполагает разработку на её основе федеральных, р е-гиональных и отраслевых программ и планов де йствий.»).

В соответствии с поставленной целью в ходе работы были решены следующие задачи.

- Выполнен обзор организационной деятельности в рамках проблемы современ ного изменения климата и результатов оценки современных климатических изменений на территории Рос сии и Якутии, а также рассмотрены основные существующие подходы к стратегиям адаптации и смягчения последствий клим атических изменений в разрезе проводимых меро приятий и их результ атов.

- Представлена комплексная оценка современных изменений климата на территории республики, включая процедуры в ыбора климатических характеристик, формирования и анализа кач ества созданной климатической базы данных и установления кли матических тенденций и их пространственных обобщений.

- Осуществлено моделирование и выполнена оценка будущих изменений климатических характери стик и их возможного воздействия на основные отрасли экономики республики, включая разработку стратегии определе ния возможных будущих измен е-ний климатических характеристик на основе сценариев и моделей, оценку их эффективности и надежности, а также выявление уя з-вимости климатических индикаторов к возможным климатич е-ским изменениям.

- Разработан макет региональной кл иматической программы адаптации для Республики Саха (Якутия).

Данная монография является первой попыткой сбора, обо б-щения и анализа имеющихся, но подчас разрозненных и несист е-матизированных данных о современных климатических изменен и-ях и их воздействии на различные секторы экономики, эк осистемы и население Якутии. В ходе исследова ния выделены пр иоритетные секторы экономики региона, нуждающиеся в практической реал и-зации конкретных адаптац ионных мер.

ГЛАВА 1. 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 республики 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 [42].

Якутия – один из наиболее «речных» (700 тыс. рек) и «озерных» (свыше 800 тыс. озер) районов России, что определяет перспективы развития гидроэнергетики [41].

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 периода (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 [63].

Современное состояние экономики Республики Саха (Якутия), прежде всего, обусловлено тем, что республика расположена в континентальной и арктической частях Дальнего Востока и характеризуется экстремальными природно-климатическими условиями и низкой плотностью транспортно-коммуникационной инфраструктуры [60]. Республика является экономическим лидером Дальневосточного федерального округа, на нее приходится 29% объема промышленного производства федерального округа, а по объему экспорта она занимает второе место [54]. Основу экономики региона составляет экспортно-ориентированная промышленность. Структура Валового регионального продукта (ВРП) республики показывает (рисунок 1.1), что добыча полезных ископаемых составляет 44% ВРП, строительство – 10%, транспорт и связь – 9%, оптовая и розничная торговля – 7%, операции с недвижимым имуществом и аренда – 5%, сельское хозяйство – 3% и остальные отрасли – 22%

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

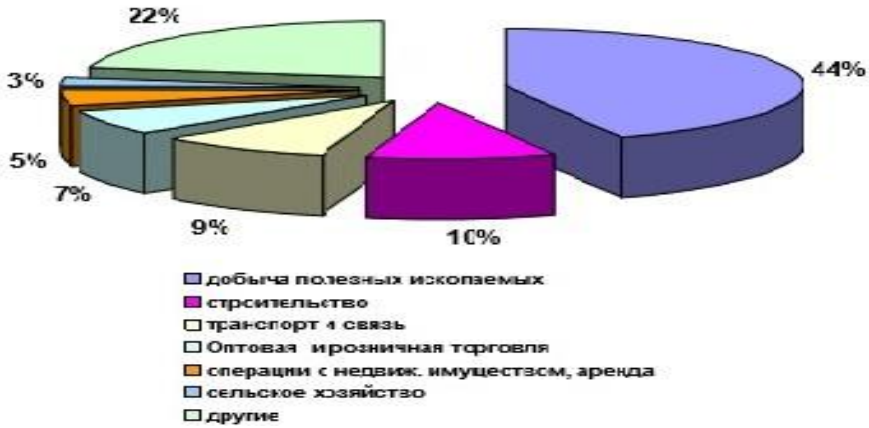

Рисунок 1.1. Отраслевая структура ВРП Республики Саха (Якутия)

Но территории Якутии выявлено свыше 1500 месторождений различных видов минерального сырья, поэтому значительны и энергетические ресурсы республики [6 1].

Общая численность населения Якутии составляет 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 [42].

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 [28]. Сегодня в результате успехов, достигнутых в области науки о климате за последние 30 лет, значительно повысились в озможности будущей оценки сезонной и межгодовой изменчивости клим ата Земли и подготовки проекций изменения климата для крупных регионов земного шара в масштабе столетий [7]. Работа в данном направлении активизировалась в 1988 г., когда мировое сообщес тво ученых объединило усилия по исследованию проблемы изм енения климата и была создана Межправительственная группа эк спертов по изменению климата (МГЭИК или IPCC) [47].

Чтобы замедлить рост или сократить выбросы парниковых газов, все государства должны разрабат ывать и реализовывать свою климатическую политику. В настоящее время большинство развитых стран разрабатывают такую политику, в которой широко используются налоговые меры, нередко в сочетании с финансов ыми стимулами, такими как гранты, льготные кредиты и т арифы. Наряду с этим ряд правительств ввели в действие национальные системы торговли квотами на выбросы парниковых газов. Местные органы власти, города и муниципалитеты имеют собственные программы деятельности [14].

Важной особенностью государственной клим атической 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 реги ональных 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 а даптации к изменению климата [10].

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

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 [51].

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 08.01.2009г. «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 разрабо-

ку и реализацию соответствующей государственной стратегии и на ее основе федеральных, региональных и отраслевых программ и планов действий [27].

Прямым и непосредственным следствием принятия Климатической доктрины явилась разработка и утверждение в 2011 г. Правительством РФ Комплексного плана ее реализации до 2020 г. [52], 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 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 [46].

Климат России, являясь частью глобальной климатической системы, испытывает очевидные изменения [18]. Начиная с середины 1970-х гг. средняя температура приземного воздуха на территории России повышается со средней скоростью 0,43°С 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°С/ 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).

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 региональноосредненных годовых сумм осадков во всех регионах, за исключением Центральной Сибири, отмечаются на фоне интенсивных межгодичных флуктуаций.

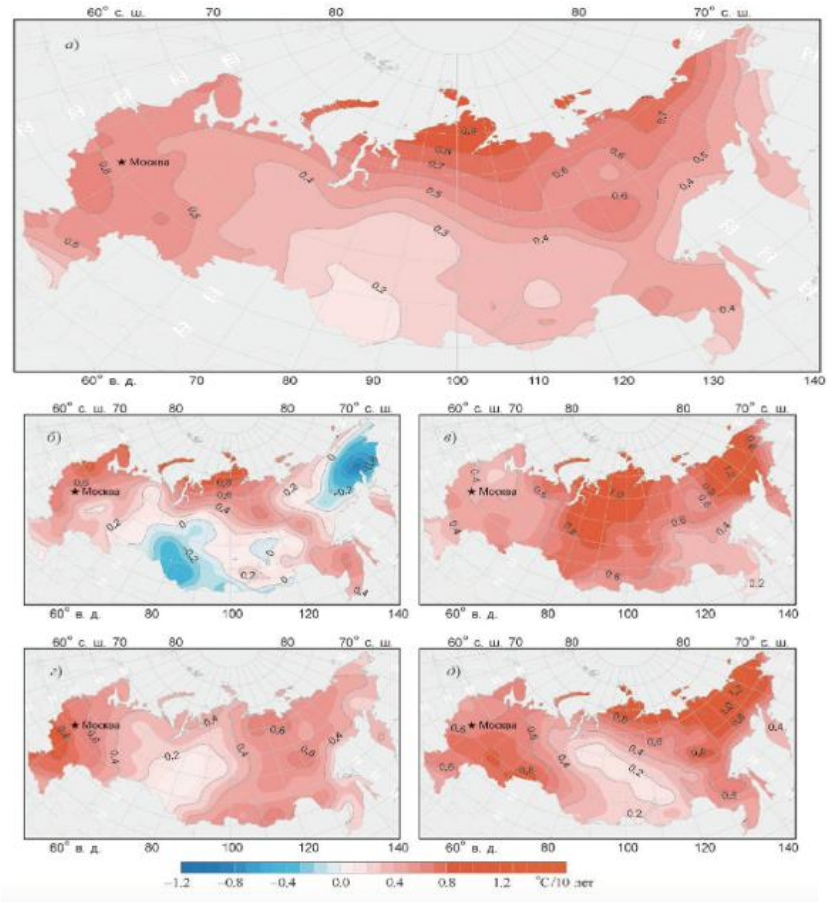

Рисунок 1.2. Географическое распределение коэффициентов линейного тренда среднегодовой (а) и средней сезонной температуры (б -д) на территории России за 1976–2012-е гг.: б) зима; в) лето; г) весна; д) осень, °С/ 10 лет

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

В последние четыре десятилетия, по данным спутниковых наблюдений, площадь снежног о покрова в переходные сезоны г ода на территории страны уменьшается.

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

Годовые минимумы и максимумы температуры воздуха ув еличиваются на бо льшей части территории России (р исунок 1.3).

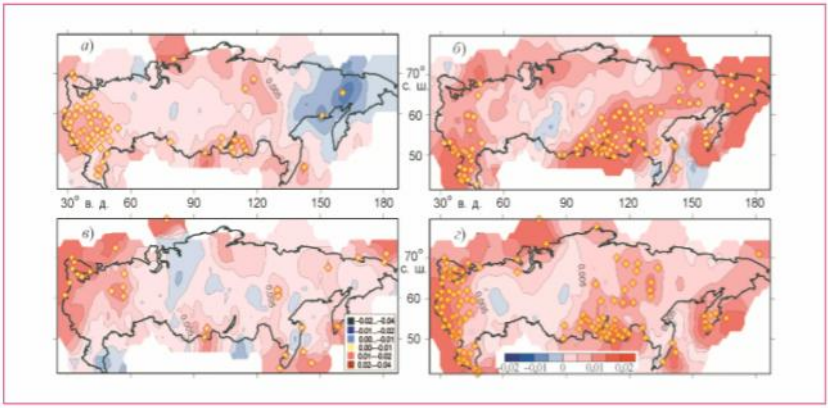

Рисунок 1.3. Изменения процентилей P95 (а, б) и P5 (в, г) нормированной аномалии температуры зимой (а, в) и летом (б, г) (линейный тренд за 1976–2009 гг.). Аномалии рассчитаны относительно 1976 –2009 гг. Шаг изолиний: 0,005 год $^{-1}$. Выделены станции, где тренд значим на уровне 5%

Во все сезоны преобладает увеличение числа суток с ан омально высокой температурой воздуха (наиболее заметное летом на Азиатской части России) и уменьшение числа суток с экстр емально 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 пр одолжительность и интенсивность в западной части страны во все сезоны имеют положительн ую тенденцию, а аналогичные характ еристики волн холода – тенденцию к уменьшению.

Также отмечается увеличение показателей засушливости на большей части земледельческой зоны России. В большинстве р егионов увеличивается число дней с экстремально малыми знач ениями влагосодержания пахотного слоя почвы [8].

Для территории Республики Саха (Яку тия) в последние де сятилетия изучение проблемы изменения климата достаточно ш ироко проводятся Институтом мерзлотоведения им. П.И. Мельн и-

кова 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 и проводились как общетеоретические по проблеме глобального потепления [1, 16, 19], так и мерзлотно-климатические [5, 9, 13, 38, 57, 58, 59, 71] и экосистемные исследования [64]. 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 [11].

Далее приведены результаты анализа изменения климата республики, полученные сотрудниками ИМЗ. Для анализа современного изменения климата и климатической изменчивости Республики Саха (Якутия) ими 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°С (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°С.

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°С и более, а на северо-западе и северо-востоке Якутии – 0,5–1°С. 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°С/ 10 лет (Саскылах) до 0,68°С/ 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 [11].

Картографические проекции изменений рассчитанных линейных трендов температуры воздуха и атмосферных осадков представлены на рисунках 1.4 – 1.5 [22, 23].

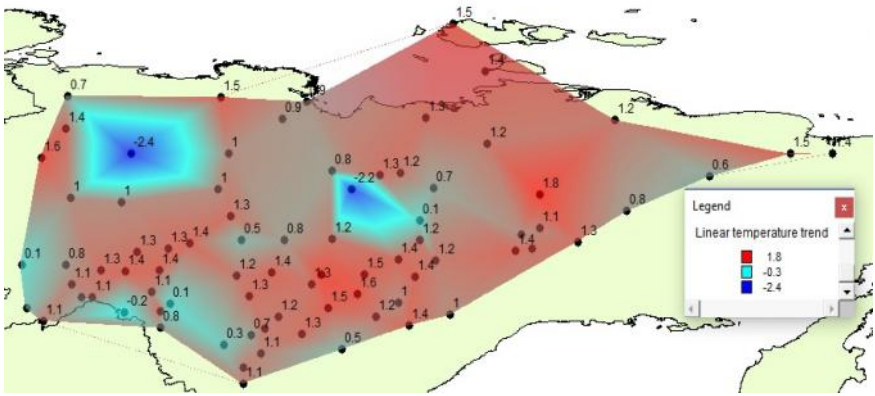

Рисунок 1.4. Изменения среднегодовой температуры воздуха на территории Якутии за период 1961–2013, °С

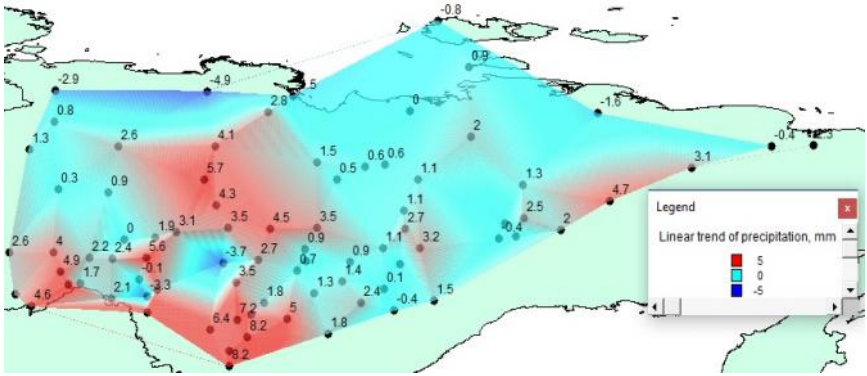

Рисунок 1.5. Изменения годовых значений атмосферных осадков на территории Якутии за период 1961 –2013, мм

1.4 Обзор стратегий 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 (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 [62].

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 [39].

Согласно принятой терминологии МГЭИК адаптация определяется как «приспособление естественных или антропогенных

систем в ответ на фактическое или ожидаемое воздействие клим ата, или его последствия, которое позволяет уменьшить вред или использовать благоприятные воз можности». В свою очередь, под смягчением последствий изменения климата понимается «ограничение и сокращение антропогенных выбросов парниковых газов».

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

- политика снижения совокупных выбросов парниковых г азов;

- государственная поддержка использования низкоуглеро дных источников энергии;

- постепенная переориентация налогов на энергию с учетом углеродоемкости топлива и политика, направленная на налогообложение выбросов углерода для эксплицитного определения цены выбросов CO_2;

- внедрение систем торговли разрешениями на выбросы;

- проведение рядом стран реформ своей политики поддер жки возобновляемой энергии через уменьшение использования сп ециальных закупочных тарифов и рост использования премий и конкурсных заявок;

- общемировой тренд на увеличение расходов на исследов ания, разработки и демонстрационные показы в области энергии, выделяемые на низкоуглеродные энергетические технологии, т акие как хранение энергии, умные сети, передовые виды топлива и автомобилей, а также улавливание и хранение углерода [37].

В России меры по применению рыночных механизмов, п остепенному сокращению или устранению рыночных диспропо рции , фискальные и иные экономическ ие стимулы являются н еотъемлемой частью национальной политики и мер в области смя гчения последствий изменения климата. К наиболее значимым з аконодательным и нормативным актам, вступившим в силу до 1 января 2010 г. и реализуемым в настоящее время или не име ющим ограничении срока действия, относятся:

- Распоряжение Правительства РФ о создании в целях реал изации обязательств, вытекающих из Киотского протокола, Росси йского реестра углеродных единиц (2006);

- Распоряжение Правительства РФ о создании в целях реа лизации 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, разр ушающим озоновый слои (2006);

- Постановление Правительства РФ о порядке утверждения и проверки хода реализации проектов, осуществляемых в соответс твии со статьёй 6 Киотского протокола к Рамочной конвенции ООН об изменении климата (2007);

- Распоряжение Правительства Р Ф об упрощении процедуры утверждения, обеспечения реализации и осуществлени я контроля проектов, реализуемых в рамках статей 6 и 17 Киотского проток ола (2009);

- Распоряжение Правительства РФ об определении «Акци онерного коммерческого Сберегательного банка РФ» организацией, уполномоченной участвовать в «торговле выбросами» парниковых газов для целей выполнения определенных количественных обяз ательств РФ по ограничению и сокращению этих выбросов (2009).

Для реализации механизмов гибкости Киотского протокол а (статьи 6, 12 и 17) в 2010 - 2011х 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» о т 15 сентября 2011 г. № 780) [55].

Следующим шагом в проблеме влияния изменений климата является разработка стратегий по адаптации. Стратегии по адапт ации должны включать в себя научные оценки рисков, уязвимости и потенциальных выгод предполагаемых климати ческих измене ний с учетом природно-географических, экономических, социал ьных и иных особенностей конкретного региона или отрасли эк ономики. 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 изм енению климата для принятия хозяйственных реш ений.

Основные подходы в подготовке адаптационных мер прив одятся 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 х озяйство, инфраструктура, здравоохранение и т.д., или целевой группы: коренное население, пожилые люди) [27].

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

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

Перечисленные результаты деятельности РКИК ООН веду тся в рамках Найробийской программы работы в области воздейс т-

вий изменения климата, уязвимости и адаптации, при нятой в 2006г.

Адаптация также является одним из «блоков» Балийкого плана действий – решения 13-й сессии Конференции Сторон РКИК ООН по укреплению долгосрочного международного с отрудничества в области климата, которое стало основой для нов ого международного климатического согла шения на «посткиотский» период (передача технологий, финансирование адаптацио нных проектов, обмен опытом, проведение совместных научно - исследовательских работ, реализации региональных адаптацио нных мероприятий) [50].

Следующий шаг, недавнее Парижское сог лашение РКИК ООН, регулирующее меры по снижению углекислого газа в атм осфере с 2020 г., сместило фокус глобальной климатической пол итики на адаптацию через расширение нормативных рамок вокруг адаптации, призыв к более жестким обязательствам в области адаптации со стороны государств, четко оговоренный многоуро вневый характер управления адаптацией и призыв к организации более прозрачных механизмов для оценки прогресса в области адаптации к проявлениям современного изменения климата. Да нное соглашение является важной вехой в текущих усилиях по обеспечению равного приоритета адаптации с политикой смягч ения последствий изменения климата. Однако предстоит проделать значительную работу, чтобы уточнить, как будет реализована зн ачительная долгосрочная цель адаптации, изложенная в статье 7. Задача, стоящая перед государствами в осуществлении Парижск ого соглашения, заключается в том, чтобы установить надежные обязательства со стороны государственных и негосударственных субъектов в отношении планирования, осуществления и финансирования адаптации [74, 75, 76, 79].

Для многих развитых стран мира стратегия адаптации к и зменению климата является официально утвержденным на наци ональном уровне документом с перечнем и распределением во вр емени конкретных мер и необходимых ресурсов [78]. 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 сц енариями изменения климата, разнообразия и неоднородности гео-

графических, социально-экономических и демографических условиях 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 [8].

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) [56]. 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 Комплек-

ного 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 [48, 72]. 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, селевые потоки и снежные лавины, ураганы и шквалистый ветер и другие), наносят огромный социально-экономический ущерб, оказывают прямое воздействие на жизненно важные отрасли экономики страны [8, 68].

Информация о мерах адаптации к изменениям климата в ключевых отраслях экономики России [67, 80] 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-Западный Федеральные округа); б) оптимизация распределения посевных площадей для зимних и весенних культур; в) расширение посевных площадей теплолюбивых (кукуруза, подсолнечник, сорго, сои 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»;

Ключевая отрасль экономики	Примеры/комментарии/меры по адаптации
	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.
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

Ключевая отрасль экономики	Примеры/комментарии/меры по адаптации
	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 Северо-Востока Якутии.

1.5 Методика исследований для формирования региональной климатической программы

Проведенное в монографии исследование по оценке современных и перспективных климатических изменений, как в метеорологических характеристиках, так и в климатических индикаторах, должно стать основой для разработки региональной климатической программы для 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 следует представить сценарные оценки будущих изменений климатических норм до конца 21 века.

В качестве базовых климатических характеристик рассматриваются 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 являются 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 четыре 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 пожар оопасный 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 на прямую влияют на динамику вырабатываемых гидроэнергетических ресурсов, связаны с затоплением территории и влиянием на речные экосистемы;
- характеристики ледового режима рек, такие как продолжительность ледостава, даты его начала и окончания, наибольшие толщины льда, имеющие значение, как в

транспортной отрасли, так и в гидроэнергетике.

Для каждого из выбранных климатических индикаторов проводилось 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 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 была сформирована основа Региональной климатической программы для Республики Саха (Якутия), включающая в себя как перечень методик, необходимых мероприятий, так и конкретные примеры реализации предлагаемых методик.

ГЛАВА 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 климатических данных 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 относится к концу XIX в. до 2014-2016 гг. 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 длинорядных 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.

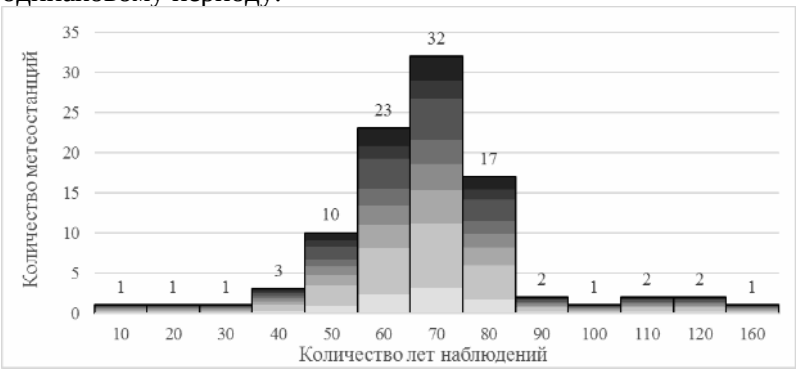

Рисунок 2.1. Распределение метеостанций Республики Саха (Якутия) по продолжительности проводимых метеонаблюдений за температурой воздуха

Региональные базы данных по температуре воздуха и атм о-сферным осадкам (БД) были сформированы с помощью СУБД - программного комплекса (ПК) «Гидрорасчеты» [Свидетельс тво о государственной регистрации программ на ЭВМ № 2010615886].

Сформированные геоинформационные слои координат м е-теостанций региональных БД по температуре воздуха и атмосфе р-ным осадкам позволили представить их на карте, как показано на рисунке 2.2.

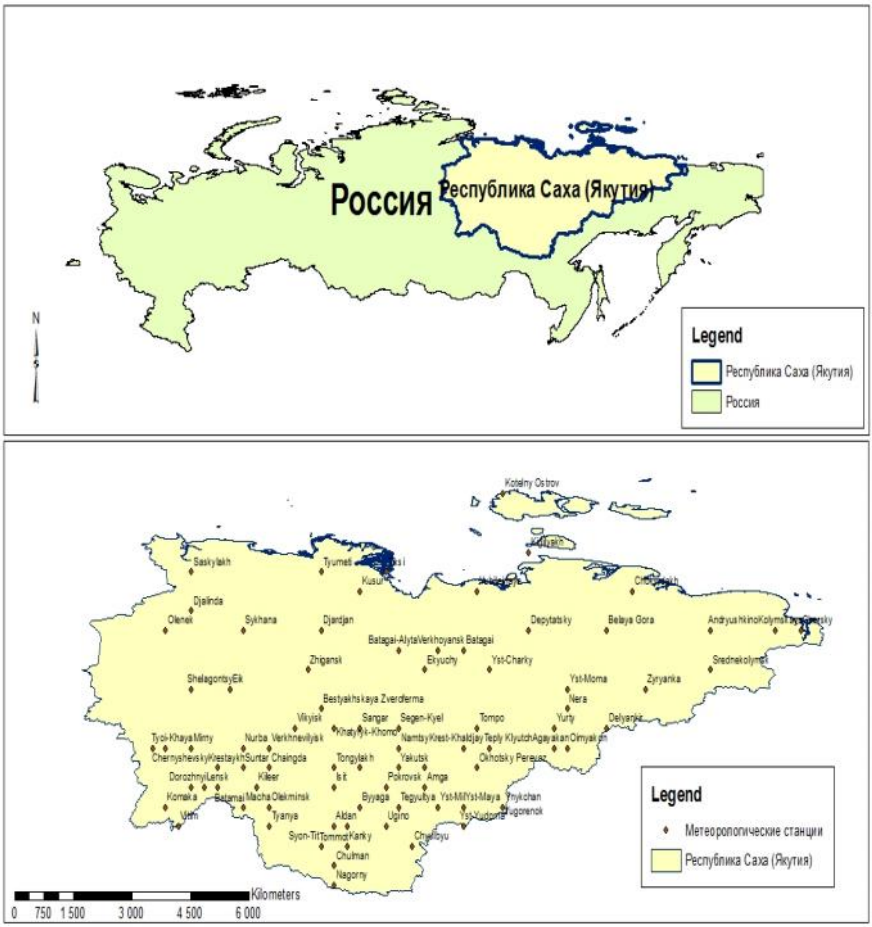

Рисунок 2.2. Расположение метеос танций региональных БД температуры воздуха и атмосферных осадков по территории Якутии

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 раздельно, 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.

Средний период наблюдений за температурой воздуха в региональной БД 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), Вилюйск (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, период 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	Тюмети	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

№	Код ВМО	Наименование станции	Широта, град	Долгота, град	Период наблюдений за температурой воздуха	Период наблюдений за атмосферными осадками
11	21946	Чокурдах	147,90	70,62	1939–2013	1939–2013
12	24076	Депутатский	139,96	69,30	1960–2013	1952–2013
13	24111	Екючю	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 Зверо-ферма	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
34	24557	Сого-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	Вилюйск	121,63	63,75	1863–2013	1898–2013
39	24643	Хатырык-Хомо	124,82	63,95	1957–2013	1952–2013
40	24644	Верхневилюйск	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

№	Код ВМО	Наименование станции	Широта, град	Долгота, град	Период наблюдений за температурой воздуха	Период наблюдений за атмосферными осадками
48	24688	Оймякон	142,79	63,46	1930–2013	1943–2013
49	24691	Делянкир	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

№	Код ВМО	Наименование станции	Широта, град	Долгота, град	Период наблюдений за температурой воздуха	Период наблюдений за атмосферными осадками
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 по 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» были сформированы региональные базы данных климатических показателей температуры воздуха и атмосферных осадков, включающие 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 [31, 53], 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 гезисом 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 в таблице 2.4 – для атмосферных осадков, при этом надо отметить, что данные таблиц подготовлены после исключения и устранения ошибок 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	α_p, %	Вид экстремума
1	Кигилях	май	Max	1990	0,9–2,5	Редкое событе
2	Джалинда	февраль	Max	1964	0,9–1,8	Редкое событие
3	Депутатский	март	Max	1990	2,0	Редкое событие
4	Батагай-Алыта	март	Max	1990	2,9	Редкое событие
5	Чумпурук	март	Max	1990	2,3	Редкое событие
6	Верхоянский Перевоз	март	Max	1989	0,9	Редкое событие
7	Крест-Хальджай	февраль	Max	1995	0,9–2,7	Редкое событие
8	Чурапча	сентябрь	Max	1983	1,4–2,5	Редкое событие
9	Исить	январь	Max	2007	0,9	Редкое событие
10	Угино	январь	Max	2007	0,9–2,6	Редкое событие
11	Хабардино	март	Max	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.

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.

Таблица 2.4.

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

№	Код	Название метеостанции	α_p, %	Месяц
1	31016	Угино	(-) 0,9–2,4	январь
2	24975	Ыныкчан	(-) 2,6–2,7	июнь
3	30089	Джикимда	(-) 1,1–2,4	июнь
4	21432	Котельный остров	(-) 1,0–1,4	октябрь
5	21802	Саскылах	(-) 1,8–2,8	март
6	24477	Иэма	(-) 0,9–2,2	август
7	25206	Среднеколымск	2,9–4,9	ноябрь

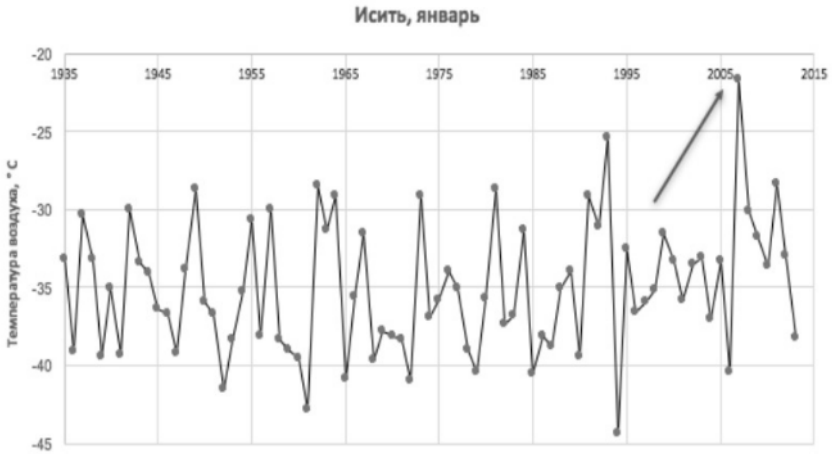

Рисунок 2.3. Пример неоднородного экстремума в ряду среднемесячных температур воздуха января на метеостанции Исить (экстремум указан стрелкой)

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 бы-

ло установлено следующее: на метеостанции Исить максимум я нваря 2007 г. обуславливается не характерной аномально высокой температурой января в -21,5°С, отличающейся от многолетней средней –35,4°С практически на 10 °С.

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	
Верхневилюйск	5		Тегюльтя	5,6	
Верхоянск	5		Теплый Ключ	5	
Верхоянский Перевоз	5		Токо	5,6	
Вилюйск	5,6		Томмот	5	
Депутатский	7		Томпо	5,6	

Станция	Номера месяцев с нестационарностью		Станция	Номера месяцев с нестационарностью	
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	
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

Станция	Номера месяцев с нестационарностью		Станция	Номера месяцев с нестационарностью	
Бестяхская Звероферма	4	2	Сухана	4	
Буяга	2,4,12		Тегюльтя	4,12	
Верхневилюйск	2,4		Теплый Ключ	4	
Верхоянск	1,12		Токо	1,2,4	3,4
Верхоянский Перевоз	4		Томмот	4	
Восточная	4		Томпо	1,4	
Делянкир	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-Алыта		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
Верхневилюйск		5	Сунтар	6	8,9
Верхоянск	5	5	Суон-Тит		5
Верхоянский Перевоз		9	Теплый Ключ		5
Вилюйск		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	
Исить	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	Сунтар	10	4,10
Верхоянский Перевоз		2,11	Суон-Тит		2,11
Вилюйск	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

Станция	Номера месяцев с нестационарностью		Станция	Номера месяцев с нестационарностью	
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, 2	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, 1 2	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
			Ярольин	2	1

Число нестационарных рядов атмосферных осадков составляет 343 (29,8%), из них 241 (20,9%) в холодный и 102 (8,9%) в теплый периоды 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 оценке 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 [29, 30, 33, 40]. 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 программного 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)

№	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	69	69	69	69	70	70	69	69	70	70	70	70
2	129	133	140	138	141	129	132	129	134	134	129	122
3	67	66	66	66	66	65	65	64	66	66	68	68
4	88	89	85	79	80	77	77	79	82	86	89	87

1 - наблюденные по температуре;

2 - восстановленные данные по температуре (не учитывались станции, по которым данные не восстановились);

3 - наблюденные по осадкам;

4 - восстановленные по осадкам (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-Граббса 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-Граббса

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

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%.

Таблица 2.11.

Оценка однородности восстановленных данных атмосферных осадков по метеостанциям Республики Саха (Якутия) по критериям Диксона и Смирнова -Граббса

№	Код	Название метео-станции	Max	№	Код	Название метео-станции	Max
Январь				Март			
1	21535	Саннико-ва пролив	(-) 1,3–2,6	1	21802	Саскылах	(-) 1,8–2,8
2	31016	Угино	(-) 0,9–2,3				

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 [2, 32, 33]. В качестве основного параметра, по которому осуществлялось сравнение моделей, было выбрано стандартное отклонение остатков, широко применяемое в регрессионном анализе и статистическом оценивании [15, 17]. 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 формуле [17]:

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

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:

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

где $\sigma_{ступ}$ – 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:

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

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:

$$\Delta_{mp} = \left(\frac{\sigma_y - \sigma_\varepsilon}{\sigma_y} \right) * 100\% \qquad (2.4)$$

,

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

где: $\Delta_{тр}$, $\Delta_{ступ}$ – относительные отклонения или отличия (в %) м оделей тренда и модели ступенчатых изменен ий от модели стаци онарной выборки,

σ_y , σ_ε , $\sigma_{ступ}$ – стандартные отклонения остатков соответс твенно моделей случайной выборки, линейного тренда и ступенч атых изменений.

В первом приближении можно считать, что если относ ительное 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 [17 , 36], показывающий, насколько статистически значимо отличаются ост аточные 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:

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

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

В числителе всегда будет дисперсия исходного ряда набл юдений, 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 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_{cm},) и Стьюдента (St_{cm}) для двух частей временного ряда по дате ступенчатого изменения из формулы (2.3), год ступенчатого изменения (T_{cmyn}.), период наблюдений в годах (N), и коэффициент корреляции уравнения линейного тренда (R_{mp}). В табл.2.12 выделены жирным шрифтом эффективные Δ и статистически значимые $\boldsymbol{F}$ и R_{mp}.

Таблица 2.12.

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

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

Примеры нестационарных рядов температуры приведены на рисунке 2.4.

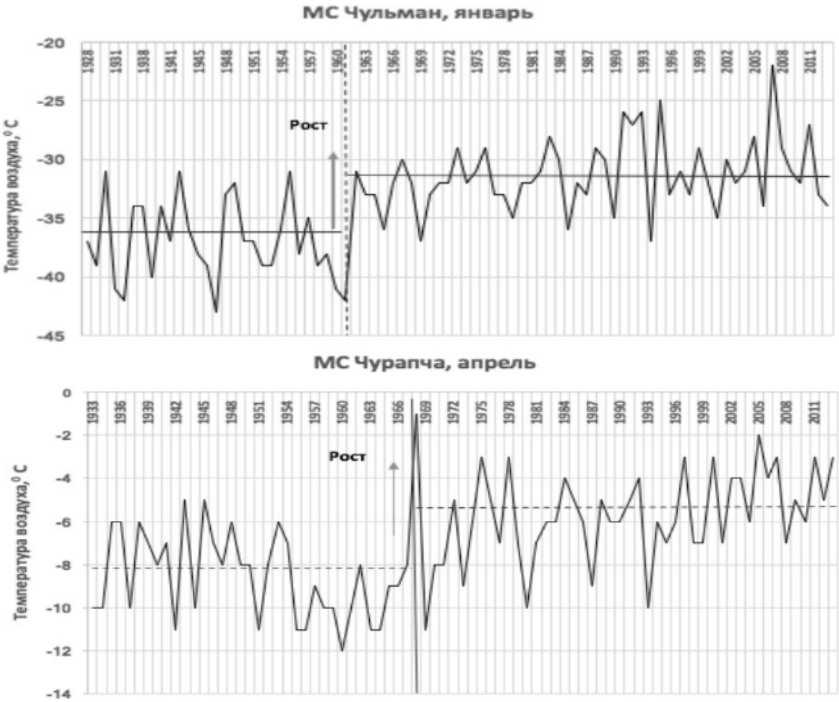

Рисунок 2.4. Примеры нестационарных рядов температуры в Якутии

Все полученные результаты по оценке эффективности нестационарных моделей в обобщенном виде для трех массивов данных: приведенные к многолетнему периоду, исходные наблюденные и данные за последний период 1960–2013 гг., показаны в таблицах 2.13–2.15 соответственно, в которых $\Delta_{ступ}$ 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 $\Delta > 10\%$, n_F – число рядов со статистически значимыми нестационарными моделями по критерию Фишера.

Таблица 2.13.

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

ПЭ	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	модель ступенчатых изменений											
$\Delta_{ст}$	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											
$\Delta_{тр}$	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 (ПЭ) нестационарных моделей среднемесячных температур воздуха в Республике Саха (Якутия) для исходных рядов наблюдений

ПЭ	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	модель ступенчатых изменений											
$\Delta_{ст}$	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 линейного тренда											
$\Delta_{тр}$	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 (ПЭ) нестационарных моделей среднемесячных температур воздуха в Республике Саха (Якутия) за период с 1960 по 2013 гг.

ПЭ	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	модель ступенчатых изменений											
$\Delta_{ст}$	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 линейного тренда											
$\Delta_{тр}$	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%) в 1,5 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 наблюденные, 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 наблюденных 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 после дний 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 $\boldsymbol{\Delta_{ступ}}$ для месяцев, где эти отличия от стационарности являются наиболее эффективными (апрель, май, июнь и январь) для данных за весь наиболее продолжительный период, включающий как наблюденные, так и восстановленные температуры воздуха. Эти пространственные распределения показаны на рисунке 2.5, где темным цветом выделена территория с $\boldsymbol{\Delta_{ступ}} > 10\%$, а оттенками серого и белого – территория со стационарными моделями.

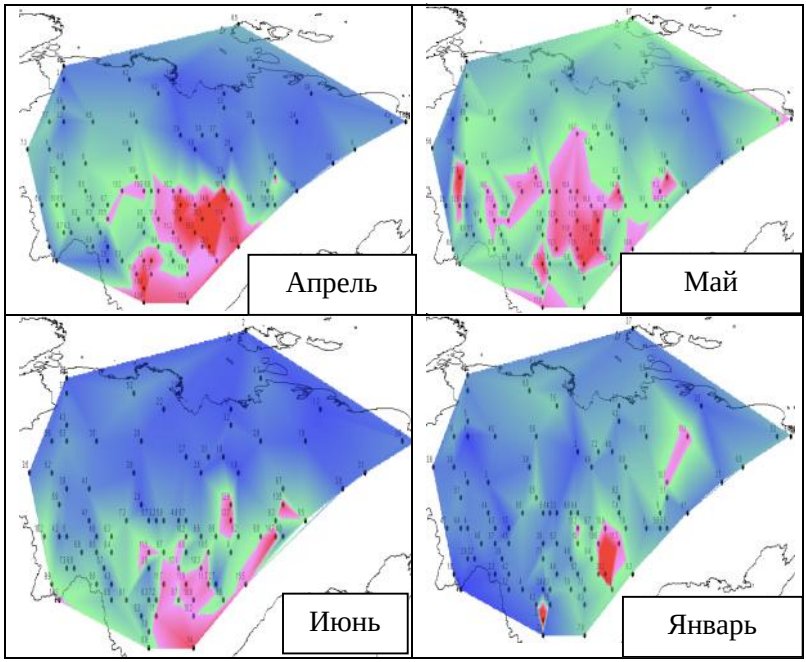

Рисунок 2.5. Пространственное распределение отклонений от стационарности $\Delta_{стун}$ в % для среднемесячной температуры за многолетний период с восстановленными и наблюденными данными
(пределы изменения $\Delta_{стун}$ по цветам:
фиолетовый – 0–5,9; розовый – 6,0-9,9; красный > 10,0)

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. В пространственном распределении $\Delta_{стун}$ января, где средний

процент нестационарных рядов также на уровне месяцев перехо дного периода и равен 9,4%, области нестационарности проявляю тся в виде отдельных очагов на востоке. В общем же в остальные месяцы года, не приведенные на рис.2.5 отдельные случаи нест ационарности наблюдаются на 3–4 метеостанциях, которые расп оложены в разных частях республики и вызваны скорее всего л окальными, 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 нестацио нарных рядов существенно увеличилось (таблица 2.15), были построены пространственные распределения Δ_{cmyn} за каждый месяц и некот орые из них с наибольшим процентом нестационарных рядов пок азаны на рисунке 2.6.

Как и за весь период наблюдений в месяцы перех одного и теплого периода года (апрель-июнь) нестациона рность охватывает южную и центральную области Якутии, занимая более половины ее южной части в июне. В тоже время, чего не н аблюдалось ранее, в месяцы холодного периода года (октябрь, ноябрь, март) нест ационарность охватывает северо-восток Якутии и наиболее выр ажена в ноябре.

Территориальная динамика нестационарности внутри года состоит в том, что, начиная с апреля резко увеличивается ее о бласть, которая занимает к июню более половины территории, смещаясь на юг. Далее в июле-августе нестационарность резко о слабевает и становится очаговой (точечной), а к сентябрю полн остью исчезает. Затем в октябре нестационарность вновь появляе тся на северо-востоке и в ноябре охватывает уже до половины те рритории на севере и востоке. В декабре территория вновь стан овится 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 наблюдае тся два территориальных максимума нестационарности: в апреле – южный и в ноябре – северо-восточный.

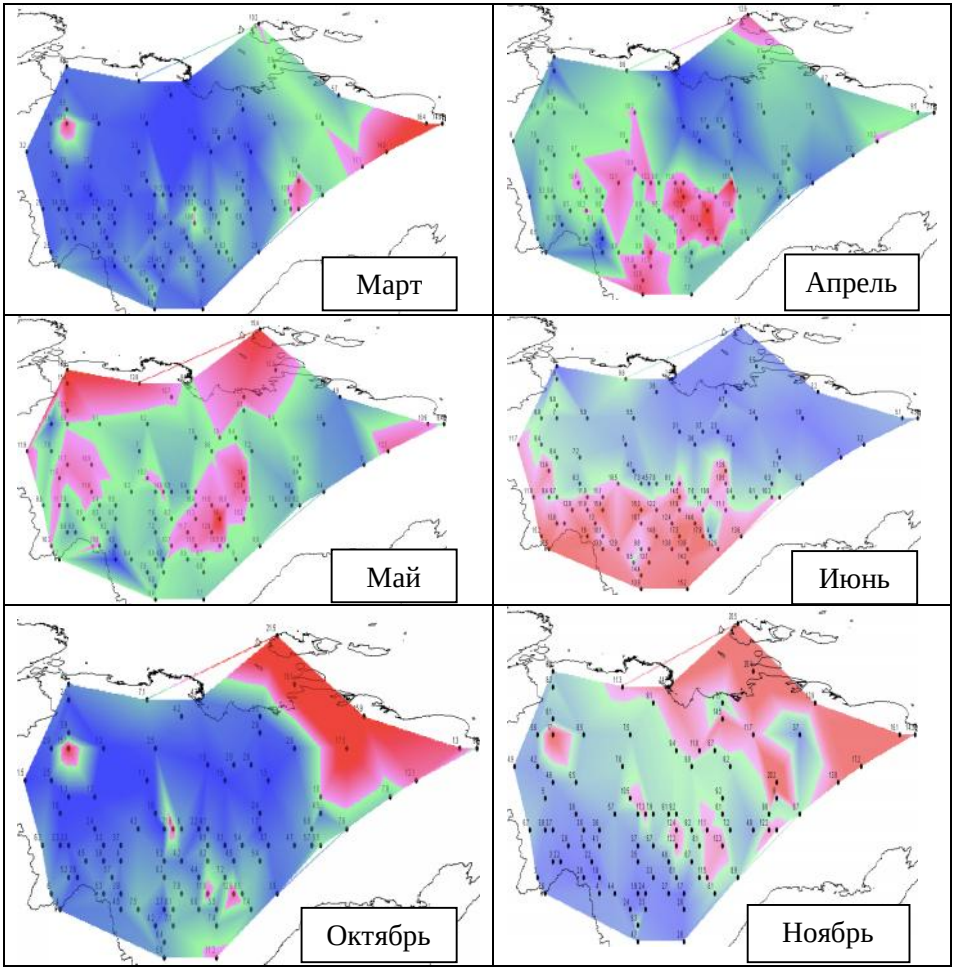

Рисунок 2.6. Пространственное распределение отклонений от нестационарности $\Delta_{ступ}$ в % для среднемесячной температуры отдельных месяцев года за период 1960–2013 гг.
(пределы изменения $\Delta_{ступ}$ по цветам: фиолетовый – 0–5,9; розовый – 6,0–9,9; красный > 10,0)

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 изм е-

нений климата, по которым зимнее потепление является самым существенным.

Предлагаемая методика оценки эффективности вида модели временного ряда является статистически обос нованной, но в тоже время имеет место и известная стратегия оценки стационарности, основанная на сравнении средних значений и дисперсий двух ча стей временного ряда по статистическим критериям Стьюд ента и Фишера соответственно [34]. 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 задав ались самые благоприятные условия для отличия средних значений.

Полученные результаты оценки стационарности по статистическим критериям Фишера и Стьюдента, а также статистической значимости коэффициентов корреляци и линейного тренда приведены в таблице 2.16, в которой n_F – число рядов со статистически значимой нестациона рностью 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 $n_н$ – 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 пе риод наблюдений с 1960 по 2013 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
$n_н$ (>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 результатам оценки стационарности многолетних рядов температур воздуха 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 сравнении 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 [24].

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 обоснован тем, что 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 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 $R_{тр}$.

Таблица 2.17.

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

Код ВМО	$\Delta_{тр}$ %	$\Delta_{ступ}$ %	$F_{тр}$	$F_{ступ}$	$T_{ступ.}$	N	$R_{тр}$
январь							
21608	5,3	**18,7**	1,11	1,51	2003	48	**0,32**
24194	**20,7**	**25**	1,59	**1,78**	1982	48	**-0,61**
24266	7,9	**11,3**	1,18	1,27	1980	48	**-0,39**
24343	**17,5**	**19,4**	1,47	1,54	2001	48	**0,56**
24382	**16,9**	**15,7**	1,45	1,41	1986	48	**-0,56**

Код ВМО	$\Delta_{тр}$ %	$\Delta_{ступ}$ %	$F_{тр}$	$F_{ступ}$	$T_{ступ.}$	N	$R_{тр}$
24585	**10,4**	**11,5**	1,24	1,28	1990	48	**0,44**
24588	**10,3**	**11,1**	1,24	1,27	1980	48	**-0,44**
24679	**14,2**	**22**	1,36	1,65	1982	47	**-0,51**
24688	**14,1**	**13,7**	1,36	1,34	1981	48	**-0,51**
25017	**24,1**	**36,6**	**1,74**	**2,49**	1990	43	**-0,65**
25121	**26,5**	**23,1**	**1,85**	1,69	1980	48	**-0,68**
25123	**10,2**	**10,9**	1,24	1,26	1983	48	**-0,44**
21608	**10**	**11,8**	1,23	1,29	1999	31	**0,43**
25400	**13,3**	**17,8**	1,33	1,48	1983	48	**-0,5**
Февраль							
21608	**10**	**11,8**	1,23	1,29	1999	31	**0,43**
21813	5,2	**13,9**	1,11	1,35	1998	48	**-0,32**
24125	4,7	**13,1**	1,1	1,32	1978	48	**0,3**
24194	**10,5**	9,7	1,25	1,23	1995	48	**-0,45**
24219	6,8	**13,3**	1,15	1,33	1995	48	**0,36**
24261	7	**11,1**	1,16	1,26	1979	48	**-0,37**
24322	4,3	**10,9**	1,09	1,26	1986	48	**0,29**
24641	6,3	**10**	1,14	1,23	1978	48	**0,35**
24679	**14,8**	**22,7**	1,38	1,68	1998	48	**-0,52**
24688	7,4	**12,2**	1,17	1,3	1995	48	**-0,38**
24725	6,9	**10,3**	1,15	1,24	1997	48	**0,36**
24826	**10,9**	**13,8**	1,26	1,35	1992	48	**0,45**
24923	9,9	**11,5**	1,23	1,28	1989	48	**0,43**
25017	9,3	**13,8**	1,22	1,35	1995	39	**-0,42**
25121	**19,1**	**18,8**	1,53	1,52	1983	48	**-0,59**
30054	**11,7**	**14,1**	1,28	1,36	1989	48	**0,47**
30173	7,8	**10,1**	1,18	1,24	1999	48	**0,39**
Март							
21813	4	**11,8**	1,08	1,28	1994	48	**-0,28**
24826	4.5	**12,2**	1,1	1,3	1985	48	**0,3**
24923	3.5	**12,2**	1,07	1,3	1989	48	0,26
Апрель							
21813	6,2	**13,5**	1,14	1,34	1992	48	**-0,35**
24111	4,9	**12,4**	1,11	1,3	1976	48	**-0,31**
24261	7,8	**18,5**	1,18	1,5	1976	48	**-0,39**

Код ВМО	$\Delta_{тр}$ %	$\Delta_{ступ}$ %	$F_{тр}$	$F_{ступ}$	$T_{ступ.}$	N	$R_{тр}$
Май							
24738	8,3	**12,2**	1,19	1,3	1991	48	**0,4**
24739	8,8	**12,1**	1,2	1,3	1992	48	**0,41**
24933	**12**	**16,2**	1,29	1,42	1996	48	**0,47**
30173	9,6	**10**	1,22	1,23	1996	48	**0,43**
Июнь							
21802	9,9	**14**	1,23	1,35	1979	47	**-0,43**
21813	**12,9**	**16**	1,32	1,42	1976	45	**-0,49**
24143	8,5	**12,3**	1,19	1,3	1986	48	**0,4**
24194	9,4	**12,5**	1,22	1,3	1979	48	**-0,42**
24538	**12,9**	**21,9**	1,32	1,64	2002	48	**0,49**
24944	6,2	**11,6**	1,14	1,28	1985	48	**-0,35**
25206	7,2	**15,9**	1,16	1,41	2003	48	**0,37**
25400	7,5	**18**	1,17	1,49	2002	48	**0,38**
Июль							
21802	**11,1**	**14,7**	1,27	1,37	1984	48	**-0,46**
24656	3	**13,1**	1,06	1,32	2003	48	0,24
24739	3,6	**11,5**	1,07	1,28	1997	48	0,26
24856	1,8	**10**	1,04	1,24	2003	48	0,19
Август							
21921	5,7	**13,2**	1,12	1,33	1983	48	**0,33**
24219	4,1	**10,3**	1,09	1,24	1996	48	**0,28**
24758	3,1	**10,6**	1,07	1,25	2003	48	0,25
25123	4,5	**14,5**	1,1	1,37	1988	48	**0,3**
31004	4,1	**10,3**	1,09	1,24	2003	48	**0,29**
31016	3,4	**11,1**	1,07	1,27	2003	48	0,26
Сентябрь							
24111	5,1	**11,6**	1,11	1,28	2002	48	**0,32**
24449	2,1	**10,6**	1,04	1,25	1996	47	0,21
24661	6,5	**10**	1,14	1,23	1993	48	**0,35**
24668	6,9	**13,5**	1,15	1,34	1996	48	**0,36**
24679	3,7	**10,6**	1,08	1,25	1998	48	0,27
24771	3,3	**10,8**	1,07	1,26	1995	48	0,25
24975	3,5	**10,4**	1,07	1,25	1996	48	0,26
30054	4,2	**11,3**	1,09	1,27	2001	48	0,29

Код ВМО	$\Delta_{тр}$ %	$\Delta_{ступ}$ %	$F_{тр}$	$F_{ступ}$	$T_{ступ}$.	N	$R_{тр}$
Октябрь							
24111	7,9	**11,5**	1,18	1,28	1996	48	**-0,39**
24143	0,3	**10,1**	1,01	1,24	1976	48	-0,07
24343	8,3	**10,2**	1,19	1,24	1990	48	**0,4**
30393	9,1	**15,1**	1,21	1,39	1996	48	**0,42**
31102	7,1	**12,1**	1,16	1,29	2001	48	**0,37**
Ноябрь							
21608	7,1	**15,4**	1,16	1,4	1999	48	**0,37**
31016	6,3	**13,7**	1,14	1,34	2001	48	**0,35**
Декабрь							
21535	6,6	**10,7**	1,15	1,25	1993	47	**0,36**
21908	9,7	**10,5**	1,23	1,25	1997	48	**-0,43**
24111	7,5	**11,2**	1,17	1,27	1986	45	**-0,38**
24194	7,4	**16,6**	1,17	1,44	1976	48	**-0,38**
24266	8,1	**11**	1,18	1,26	1989	48	**-0,39**
24639	**12,1**	**13**	1,3	1,32	2000	48	**-0,48**
24661	5,6	**10,6**	1,12	1,25	1994	48	**-0,33**
24753	7	**11,1**	1,16	1,26	1994	48	**-0,37**
24768	7,2	**11**	1,16	1,26	1994	48	**-0,37**
24856	**14,2**	**17,4**	1,36	1,47	1991	48	**-0,51**
24959	8	**12,6**	1,18	1,31	1994	48	**-0,39**
24962	9,2	**11,7**	1,21	1,28	1994	48	**-0,42**

В более обобщенном виде результаты моделирования представлены в таблице 2.18, где $\Delta_{ступ}$ 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 $\Delta > 10\%$, n_F – число рядов со статистически значимыми нестационарными моделями по критерию Фишера.

Таблица 2.18.

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

ПЭ	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Модель ступенчатых изменений											
$\Delta_{ступ}$	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
n_F	2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	Модель линейного тренда											
$\Delta_{тр}$	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
n_F	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 моделей линейного тренда (2,1%) почти в четыре раза. Поэтому можно сделать вывод, что модель ступенчатых изменений в целом эффективнее, чем модель линейного тренда. В то же время по абсолютной величине, как средний процент, так и число нестационарных моделей невелико, 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 $\Delta_{ступ}$ для месяцев, где эти отличия от стационарности являются наиболее существенными (декабрь, январь, февраль, сентябрь). Эти пространственные распределения показаны на рисунках 2.7 и 2.8.

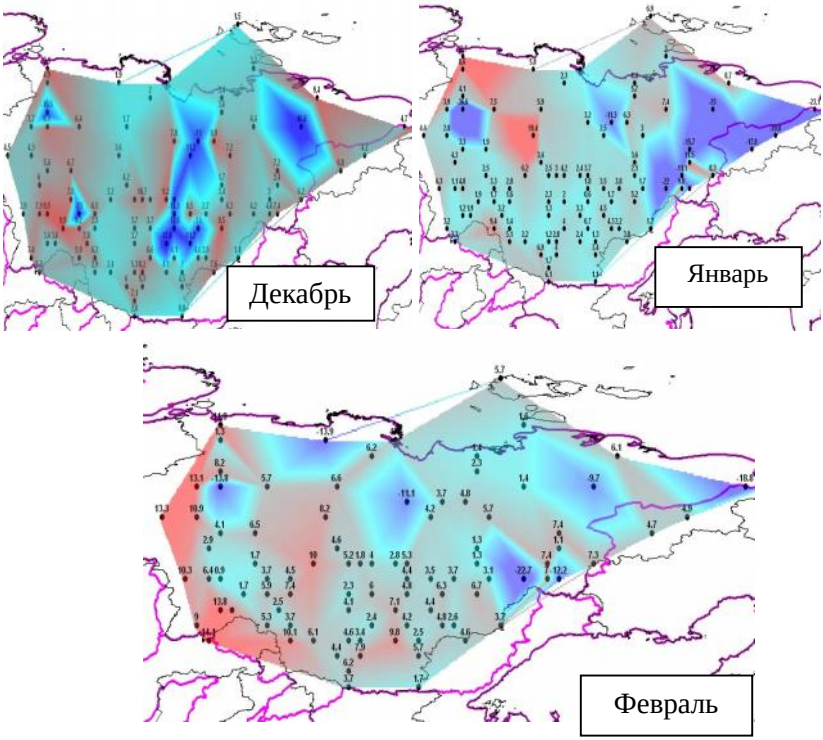

Рисунок 2.7. Пространственные модели отклонений от стационарности $\Delta_{ступ}$ в % для атмосферных осадков за период с 1966 по 2013 гг. по территории Республики Саха (Якутия)
(пределы изменения Δступ % по цветам: синий – -10,0 и выше; зеленый – 0–9,9; красный – 10,0 и выше)

В начале переходного сезона (апрель) происходит усиление нестационарности на севере республики. Весной (май) снова происходит ослабление нестационарности, территория республики становится почти полностью стационарной, за исключением небольшого очага нестационарности на западе. В начале летнего сезона (июнь) происходит второй всплеск нестационарности, но б о-

лее слабый по сравнению с зимним, который имеет очаговый х арактер и проявляет себя практически на всей территории респу блики за исключением ее се верной оконечности и центра. В оста вшиеся летние месяцы (июль и август) территория республ ики снова становится стационарной за исключением точечного распр остранения нестационарности уже в разных частях республики. Осенью (сентябрь) происходит третий всплес к нестационарности, который проявляет себя наиболее сильно в восточной и централ ьной частях и несколько меньше на западе Якутии. В начале зимн его периода (октябрь, ноябрь) нест ационарность снова ослабевает и проявляет себя в виде небольших очагов, постепен но смещаясь с западной части на север и центральную части респу блики, чтобы вновь обрести силу в декабре.

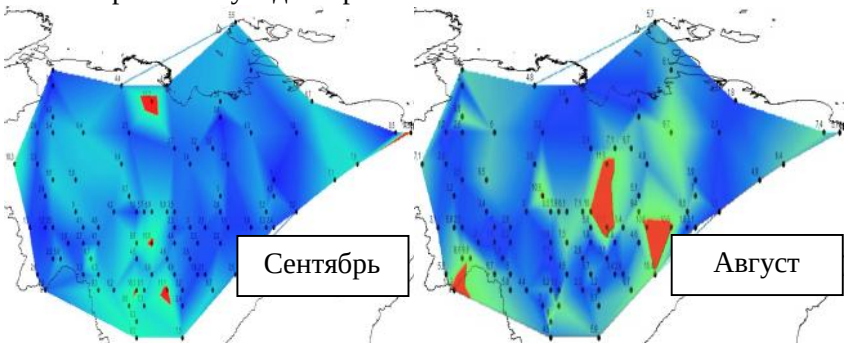

Рисунок 2.8. Пространственные модели отклонений от стационарности $\Delta_{ступ}$ в % для среднемесячных атмосферных осадков за период с 1966 по 2013 гг . по территории Республики Саха (Якутия)
(пределы изменения Δступ % по по цветам: синий – 0–5,9; зеленый – 6,0–9,9; красный >10)

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

Также было проведено сравнение с известной методикой оценки стационарности средних и дисперсий за две последов ательных части временного р яда. Все полученные результаты оце нки стационарности по статистическим критериям Фишера и Сть юдента, а также статистической значимости коэффициентов корр еляции линейного тренда приведены в т аблице 2.19.

Таблица 2.19

Число нестационарных рядов наблюдений за суммами месячных атмосферных осадков 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**
$n_н$ (>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 измене ний) наибольшее число нестационарных рядов выявлено по критерию Стьюдента, а наименьшее – по эффективной модели ступенчатых изменений. Вместе с тем, период с наибольшей нестационарн о-стью приходится у всех трех методов на декабрь и февраль, хотя максимум может варьироваться в течение года.

Примеры нестационарных рядов осадков приведены на рис.2.9

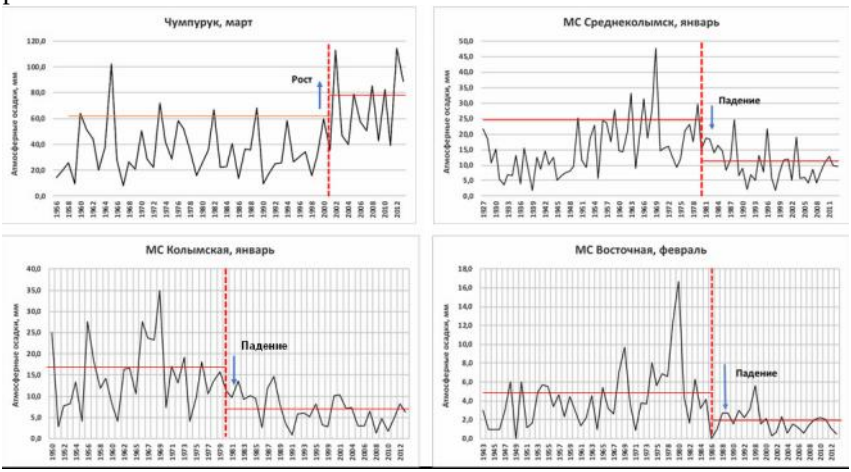

Рисунок 2.9. Примеры нестационарных рядов осадков на метеостанциях Якутии

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 сравнении с широко применяемой в настоящее время моделью линейного тренда и ступенчатый рост/ ступенчатое снижение атмосферных осадков относится к 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 в выраженно себя проявляющая на северо-востоке республики. В теплый период года (с мая по сентябрь) наблюдается противоположная тенденция – к их росту [25].

2.4 Оценка устойчивости полученных изменений

Особенность эмпирико-статистических моделей заключается в том, что их параметры могут не оставаться постоянными во времени, и, следовательно, требуется проводить пересчет при появлении новых данных. В настоящей работе моделирование временных рядов температур воздуха и атмосферных осадков было проведено по 2013 г. включительно. Для проверки устойчивости моделей и оценки их эволюции был проведен анализ с включением последних лет наблюдений по 2016 г., которые получены с сай-

та Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации.

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.

По выбранным рядам наблюдений за среднемесячной температурой воздуха выполнено статистическое моделирование за период наблюдений с 1960 г. по 2016 г. включительно. При этом процедура восстановления пропусков и приведения к многолетнему периоду не применялась, чтобы не внести дополнительные погрешности в результаты моделирования, которые предста влены в 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	Δ_{mp}%	$\Delta_{ступ}$%	F_{mp}	$F_{ступ}$	$T_{ступ}$,	N	R_{mp}
Январь								
24266	2013	8,3	8,9	1,19	1,21	1991	54	0,4
	2016	9,3	9,4	1,21	1,22	1991	57	0,42
24641	2013	4,4	7,2	1,09	1,16	1991	54	0,29
	2016	4,3	6,7	1,09	1,15	1991	57	0,29
24944	2013	0,2	0,8	1	1,02	1981	54	0,06
	2016	0,2	0,8	1	1,02	1981	57	0,07
24959	2013	7,1	**10,7**	1,16	1,25	1991	54	0,37
	2016	8,3	**11,4**	1,19	1,27	1991	57	0,4
24966	2013	4,3	**23,3**	1,09	1,7	1974	54	0,29
	2016	2,6	**20,8**	1,05	1,59	1974	57	0,23

Код ВМО	Посл, год	$\Delta_{тр}$%	$\Delta_{ступ}$%	$F_{тр}$	$F_{ступ}$	$T_{ступ}$,	N	$R_{тр}$
Апрель								
24266	2013	5,6	5,7	1,12	1,12	1972	54	0,33
	2016	8,3	8,1	1,19	1,18	2005	57	0,4
24641	2013	**12,4**	**12,1**	1,3	1,29	1997	54	0,48
	2016	**15,1**	**14,4**	1,39	1,36	1997	57	0,53
24944	2013	0,2	2,4	1	1,05	1997	54	0,06
	2016	0,6	3,1	1,01	1,07	1997	57	0,11
24959	2013	**13,6**	**12,2**	1,34	1,3	1974	54	0,5
	2016	**16,9**	**13,1**	1,45	1,32	2002	57	0,56
24966	2013	0,9	**13,1**	1,02	1,32	1971	54	-0,13
	2016	0,1	8,6	1	1,2	2006	57	0,05
Июль								
24266	2013	7,9	9,1	1,18	1,21	1991	54	0,39
	2016	5,9	7,8	1,13	1,18	1991	57	0,34
24641	2013	2,7	4,5	1,06	1,1	1991	54	0,23
	2016	3,4	5	1,07	1,11	1991	57	0,26
24944	2013	0,4	2,2	1,01	1,05	1986	54	0,09
	2016	0,2	1,9	1	1,04	1980	57	0,06
24959	2013	6,6	9,7	1,15	1,23	1997	54	0,36
	2016	5,6	8,6	1,12	1,2	1997	57	0,33
24966	2013	0,2	4,8	1	1,1	2001	54	0,06
	2016	0,6	5,8	1,01	1,13	2001	57	0,11
Сентябрь								
24266	2013	0,3	1,2	1,01	1,02	2003	54	0,08

Код ВМО	Посл, год	$\Delta_{тр}$%	$\Delta_{ступ}$%	$F_{тр}$	$F_{ступ}$	$T_{ступ}$,	N	$R_{тр}$
	2015	0,6	1,6	1,01	1,03	2003	56	0,11
24641	2013	2,7	5,8	1,06	1,13	2003	54	0,23
	2015	2,5	5,2	1,05	1,11	2003	56	0,22
24944	2013	0	0,8	1	1,02	1970	54	-0,01
	2015	0,1	0,8	1	1,02	1996	56	-0,03
24959	2013	1,1	4,8	1,02	1,1	2002	54	0,15
	2015	1	4,3	1,02	1,09	2002	56	0,14
24966	2013	0	4,7	1	1,1	1971	54	0,01
	2015	0,2	5,6	1	1,12	2003	56	0,06

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

- число нестационарных моделей, построенных как до 2013 г., так и до 2016 г., является наибольшим в переходный к теплому 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.

ГЛАВА 3. ОЦЕНКА БУДУЩИХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ИХ ВОЗМОЖНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОСНОВНЫЕ ОТРАСЛИ РЕСПУБЛИКИ

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 являетс я проблема глобального изменения климата, происходящего за счет антропогенной де ятельности 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 др угих блоков. В 2005–2006-х гг. рабочая группа по совместным м оделям между атмосферой и океаном (Working Group on Coupled Modelling – WGCM) начала собирать результаты климатического моделирования ведущих научных центров по всему миру. Собра нные в виде архивов результаты моделирования прошлого, насто ящего и будущего климата сформировали третью фазу проекта по сравнению взаимосвязанных моделей (Coupled Model Intercomparison Project – CMIP3). Эта коллекция результатов мод елирования получила название «Мультимодельные наборы данных проекта CMIP3 Всемирной программы исследований климата» или «WCRP CMIP3 multi-model dataset». Она представляет собой все-объемлющий архив большого набора данных по климату двадца-того и двадцать первого веков и других экспериментов.

В сентябре 2008 г. на встрече с участием 20 ведущих межд у-народных коллективов по моделированию климата в рамках раб очей группы по моделям взаимодействия между атмосферой и океаном была достигнута договоренность о проведении следу ющего этапа работ с использованием нового набора скоординир о-ванных экспериментов. Эти эксперименты сформировали пятую фазу международного проекта по сравнению моделей (CMIP5).

В проекте CMIP5 представлены новые сценарии RCP (Repre-sentative Concentration Pathway), связанные со стабилизацией о б-щего антропогенного воздействия в 2100 г. также на разных уро в-

нях: 2.6, 4.5, и 8.5 Вт/м^2 и вместо концентрации CO_2 в ppm в этих сценариях дан общий эффект воздействия в Вт/м^2. 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 [43 , 44]. В список моделей, выбранных нами для моделирования будущих климатических и з-менений 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 кл и-мата, 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 климат и-ческих характеристик на основе сценариев и моделей для Якутии состоял из следующих этапов, которые будут детально рассмотр е-ны в соответствующих разделах главы:

- поиск и получение данных по выбран ным 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 ан а-лиза;

- 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°x1°, 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 репрезентативных 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	
Якутск	0,65	0,83	0,62	0,61	1

Апрель					
	Верхоянск	Вилюйск	Олекминск	Усть-Мая	Якутск
Верхоянск	1				
Вилюйск	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	Вилюйск	Олекминск	Усть-Мая	Якутск
Верхоянск	1				
Вилюйск	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	Вилюйск	Олекминск	Усть-Мая	Якутск
Верхоянск	1				
Вилюйск	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 коэ ффициенты корреляции между станциями в разных частях ре спублики в среднем не очень высокие и связанность зависит от сезона года. Наименьшая территориальная связанность имеет место ве сной со средним коэффициентом корреляции *Rcp*=0,40, наибольшая в сентябре (*Rcp*=0,67), затем летом (*Rcp*=0,59) и зимой (*Rcp*=0,54). Наиболее высокая связанность наблюдается между метеостанци ями Вилюйск, 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 наблюденной 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 наблюденными 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), за последний период наблюдений и по разным моделям: CNRM, MPI и BCC. Для метео-

станции Олекминск во всех случаях коэффициент ко рреляции был меньше 0,5.

Пример временного графика среднемесячной температуры августа по данным наблюдений и моделирования для мет еостанции Верхоянск показан на р исунке 3.2 при R=0,63 за весь период наблюдений.

Рисунок 3.2. Хронологические графики наблюденной (сплошная линия) и смод елированной (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 во з-духа в каждой отдельной точке поверхности Зе мли, 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 наблюд ений – по 96 метеостанциям на территории республики. Для сравнения был выбран период, рекомендованный ВМО (1961–1990 гг.), а в качестве исследуемых месяцев – характерные месяцы года: я нварь и июль. Коэффициенты корреляции между средними терр и-

ториальными температурами по данным наблюдения и моделирования приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3.

Коэффициенты корреляции между наблюденной 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 в 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 наблюденными 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 наблюденных в пределах ±1 °C, а в первой строке приведены нормы наблюденных 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

Модель	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
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°С, 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°С 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 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 наблюденной для всех 5 выбранных метеостанций приведено на рисунках 3.3-3.7 за месяцы основных сезонов года и за разные периоды осреднения.

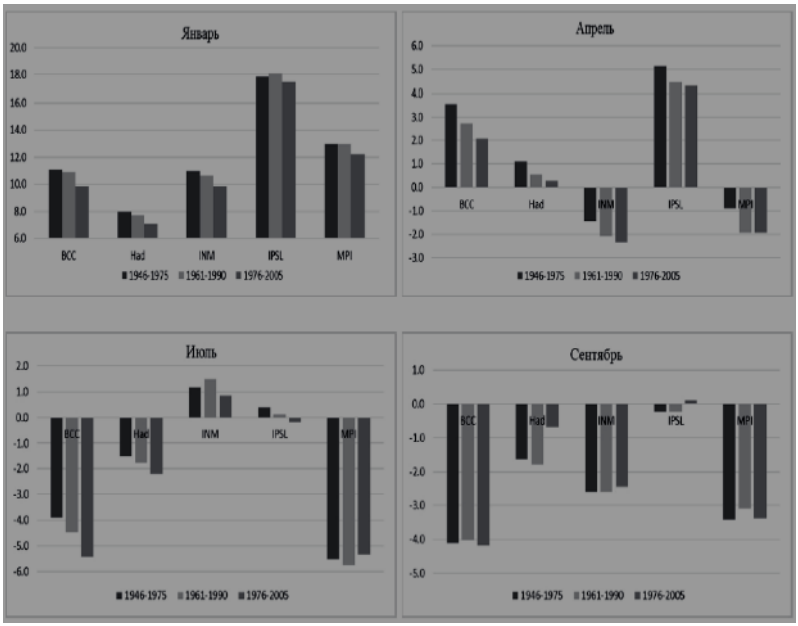

Рисунок 3.3. Отклонения норм расчетной температуры по моделям от фактически наблюденной на метеостанции Верхоянск за совместный период

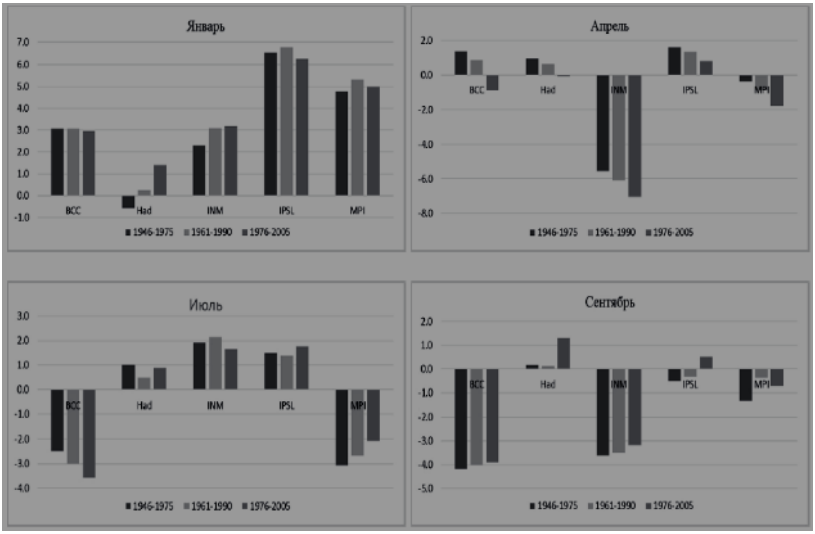

Рисунок 3.4. Отклонения норм расчетной температуры по моделям от фактически наблюденной на метеостанции Вилюйск за совместный период

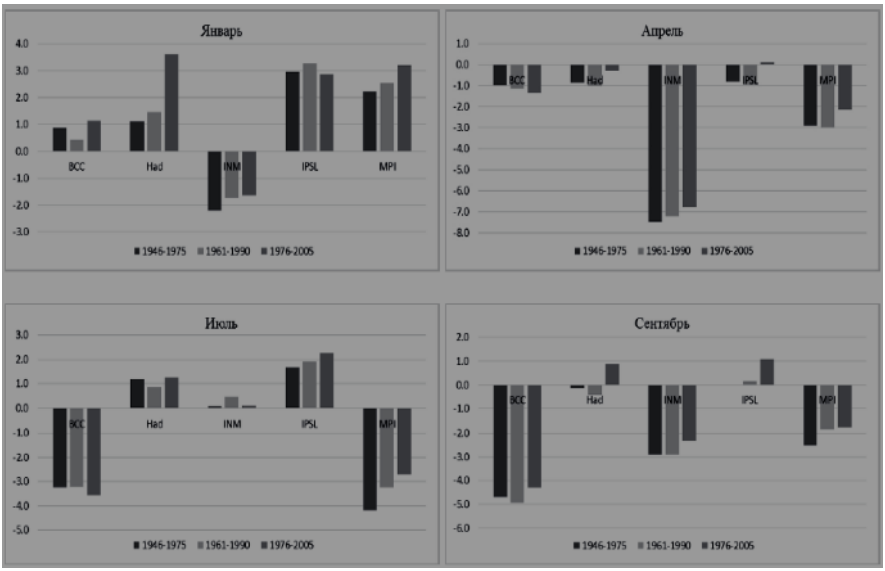

Рисунок 3.5. Отклонения норм расчетной температуры по моделям от фактически наблюденной на метеостанции Олекминск за совместный период

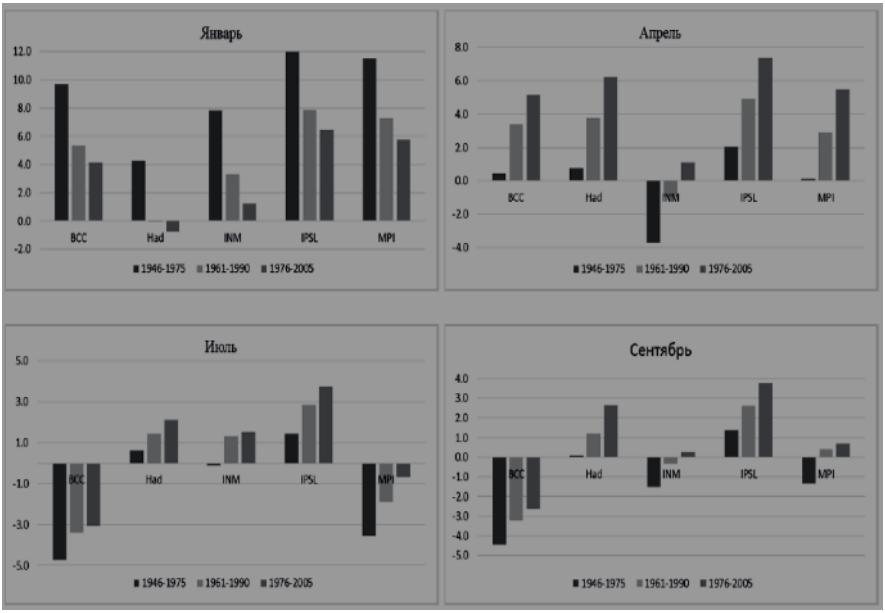

Рисунок 3.6. Отклонения норм расчетной температуры по моделям от фактически наблюденной на метеостанции Усть-Майя за совместный период

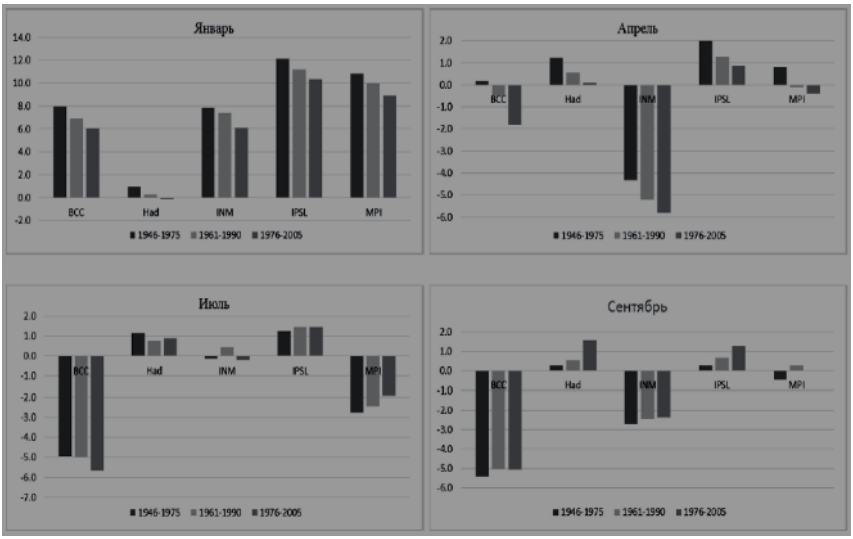

Рисунок 3.7. Отклонения норм расчетной температуры по моделям от фактически наблюденной на метеостанции Якутск за совместный период

На основе выполненных расчетов и представленных на рисунках 3.3–3.7 результатов можно оценить какая из моделей лучше всего рассчитывает нормы фактической температуры за разные интервалы времени. Причем помимо выборочных 30-летних периодов рассматривался также и весь период наблюдений, и период, рекомендуемый 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 (ΔT=+7 ─ +8^{0}C в январе и ΔT=+0,3° ─ +0,6°C в апреле), а в месяцы теплого периода года – модель IPSL (ΔT=-0,2° ─ +0,4°C в июле и ΔT= -0,2° ─ +0,1°C в сентябре).

2. Для метеостанции Вилюйск (Западная Якутия) модель HadGEM2 является наиболее эффективной уже в течение трех сезонов: зима, весна лето (ΔT= -1,3° ─ +1,4°C в январе, ΔT=+0,2° ─ +0,9°C в апреле и ΔT=+0,5° ─ +1,4°C в июле), а осенью наилучшей является модель IPSL (ΔT= -0,3° ─ -0,5°C в сентябре).

3. Для метеостанции Олекминск (Южная Якутия) в январе наиболее подходит модель BCC (ΔT= +0,4° ─ +1,2°C), в апреле

наилучшими являются две модели: HadGEM2 (ΔT=-0,3° ─ -0,1°C) и IPSL (ΔT=-1,0° ─ +0,1°C), в июле – модель INM (ΔT =-0,1° ─ +0,5°C) и в сентябре – HadGEM2 - модель (ΔT=-0,4° ─ +0,9°C).

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

5. Для метеостанции Якутск (Центральная Якутия): модель Hadley является наилучшей для января (ΔT =-0,1° ─ +1,2°C); для апреля - модели Hadley (ΔT =+0,1° ─ +1,2°C) и MPI (ΔT =-0,4° ─ +0,8°C), для июля – модель INM (ΔT =-0,3° ─ +0,4°C) и для сентября – модель MPI (ΔT =-1,6° ─ +0,2°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°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 температуры воздуха для территории Республики Саха (Якутия) и оценка надежности

На основе выбранных климатических моделей была выполнена 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. Значения систематических погрешностей 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

Сценарий	Периоды, месяцы											
	2011-2040 гг.				2041-2070 гг.				2071-2100 гг.			
	I	IV	VII	IX	I	IV	VII	IX	I	IV	VII	IX
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
Усть-Майя												
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 метеостанции 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.

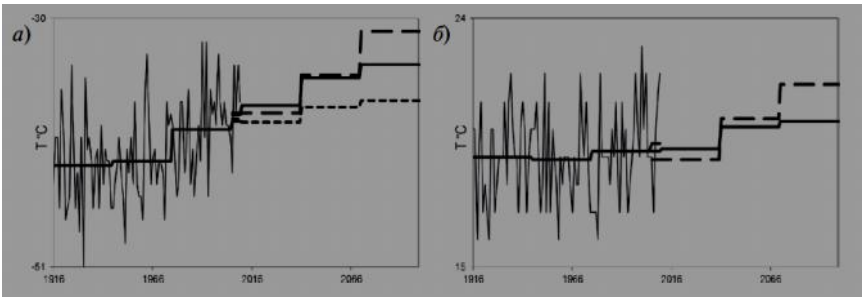

Рисунок 3.8. Многолетние ряды температуры января (а) и (б) июля на метеостанции Якутск и климатические нормы по данным наблюдений и сценарных оценок до конца XXI в.

Из представленных в таблице 3.5 результатов следует:

- наибольший рост температуры следует ожидать зимой до 4 –6°С в последней трети XXI века по среднему сценарию RCP4.5, хотя по самому неблагоприятному сценарию RCP8.5 рост температур может быть до 9–10°С и даже до 17°С 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 2020 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 [26].

3.4 Выбор эффективной климатической модели и сценарные оценки 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. Результаты анализа показали, что коэффициенты корреляции между станциями в разных частях республики в среднем очень низкие по сравнению с температурными данными и увеличение 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, вычис-

ленных за последовательные 30-летние периоды по результатам моделирования и наблюдений. Рассчитанные климатические нормы и разности между наблюденными и смоделированными нормами осадков (ΔP, мм) за разные интервалы времени даны в таблицах 3.6–3.10 для выбранных метеостанций за характерные месяцы сезонов года, где жирным шрифтом выделены самые низкие отклонения смоделированных данных осадков от наблюденных, а в первой строке приведены нормы наблюденных атмосферных осадков (“наблюд.”). При этом, если разности были более 50% от абсолютной величины сумм осадков за месяц, то данные моделирования признавались не эффективными. Поэтому в некоторые месяцы моделирование было признано неэффективным по всем моделям. Приоритетными при выборе эффективной модели были последний и весь период наблюдений.

Анализ данных, приведенных в таблицах, показывает, что весной (апрель), когда осадков еще немного, 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.

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

Модель	Месяцы			
	Январь	Апрель	Июль	Сентябрь
1946–1975				
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 моделир о-вания и наблюдений (мм) для метеостанции Вилюйск, Западная Якутия

Модель	Месяцы			
	Январь	Апрель	Июль	Сентябрь
1916–1945				
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
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

Модель	Месяцы			
	Январь	Апрель	Июль	Сентябрь
1946–1975				
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**
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 моделир о-вания и наблюдений (мм) для метеостанции Усть -Мая, Восточная Якутия

Модель	Месяцы			
	Январь	Апрель	Июль	Сентябрь
1946–1975				
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 моделир о-вания и наблюдений (мм) для метеостанции Якутск, Центральная Якутия

Модель	Месяцы			
	Январь	Апрель	Июль	Сентябрь
1916–1945				
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

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.

На основе выбранных климатических моделей была дана сценарная оценка изменения осадков на территории республики до 2100 г., разделенная на три 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.

Таблица 3.11.

Выбранные климатические модели для сценарной оценки осадков на метеостанциях Якутии

Станция	Месяцы			
	Январь	Апрель	Июль	Сентябрь
Верхоянск	Had/IPSL/MPI	**Нет**	INM	**Нет**
Вилюйск	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

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/	9,6/	–	2,2/35	8,3/23	–	1,9/31	10,8/	–

Сценарий	Периоды, месяцы								
	2011–2040 гг.			2041–2070 гг.			2071–2100 гг.		
	I	VII	IX	I	VII	IX	I	VII	IX
	21	25						30	
RCP8,5	1,2/ 19	13,6/ 38	–	1,8/29	19,9/ 55	–	5,9/95	18,2/ 50	–
	Вилюйск								
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
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-Майя								
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 ожидается рост осадков зимой и осенью в пределах от 10 до 60%. Наибольший рост количества осадков ожидается в летний период, на некоторых станциях количество осадков может увеличиться в два раза.

При этом для станции Вилюйск в Западной Якутии ожидается зн а-чительное снижение осадков.

ГЛАВА 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. Особе н-ности современного и будущего изменения температур воздуха и осадков на территории Якутии изучены и представлены также и в опубликованных рабо тах [24, 25, 26], из которых следует, что те м-пература воздуха выросла и стала более нестационарной в после д-ние годы, а в осадках таких явных и устойчивых закономерностей не установлено, хотя также имеет место тенденция их роста. Вм е-сте с тем не меньший инт ерес представляет отклик других пр и-родных показателей на изменение этих климатических характер и-стик.

Для оценки уязвимости различных отраслей экономики к изменению климата и смягчения последствий этого влияния необ-ходимо решить следующую важную задачу: оп ределить, как изм е-нение основных климатических факторов влияет на следующий уровень климатических характеристик , который представляют с о-бой прикладные климатические характеристики или климатич е-ские индикаторы [69]. Эти индикаторы в свою очередь оказывают прямое влияние на различные отрасли экономики и учитываются при проектировании и эксплуатации различных систем, сооруж е-ний и объектов. Именно такие климатические индикаторы ра с-сматриваются в рабочих группах МГЭИК, исследующих адапт а-цию, уязвимость и смягчен ие воздействий на измен ение климата [20, 21].

В настоящей главе рассматривается динамика четырех ос-новных климатических индикаторов на территории Республики Саха. Это:

- количество и площади пожаров по отдельным лесничествам, которые определяются степенью засушливости климата;
- температура почты на разных глубинах, которая характеризует свойства вечной мерзлоты;
- максимальные расходы и уровни воды, характеризующие инте нсивность весеннего половодья;
- характеристики ледового режима рек, такие как максима льная толщина льда на реках, продолжительность периода ледостава, даты его начала и окончания, а также характерных максимальных уровней: начала ледостава, ледохода, заторных.

Каждый из рассматриваемых климатических индикаторов является важным фактором для экономики республики. Так, ле сные пожары – это не только опасное природное явление, но и фа ктор, влияющий на лесное и сельское хозяйство, здоровье людей, инфраструктуру. Температура почвы и ее динамика является ва жным фактором в сельском хозяйстве, строите льстве, транспорте. Максимальные расходы и уровни весеннего половодья определ яют, как опасные условия затопления, так и показатели гидроэне ргетики, сельского и коммунального хозяйства. Показатели ледово го режима рек определяют продолжительность существования «зимников», как основных путей сообщения в зимний период.

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 ле сных пожаров. Лесные пожары уже сейчас создают огромную п отенциальную угрозу для Якутии. Ежегодно республика тратит баснословные финансовые средства на борьбу с лесными пожар ами, например, 4 116 210 881,69 руб. – в 2013-м и 3 805 684 668,02 руб. – в 2014-м гг. (согласно ста тистическим данным Департаме нта лесного хозяйства Республики Саха (Якутия)). При этом важно понимать, что финансовые расходы показывают только одну ст орону ущерба от лесных пожаров – экономическую. Расходы на тушение действующих и предотвращение потенциаль ных лесных пожаров, воздействие смога от пожаров на здоровье населения, особенно его наиболее уязвимые группы – детей и людей пожило-

го 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 [81]. 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 наблюденной 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 аэрономии 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 случалось вследствие неконтролируемых сельхозпалов, в свою очередь, пожары середины лета – были вызваны влиянием погодных условий [73], что позволяет сделать вывод о том, что в контексте климатических изменений имеет смысл рассматривать пожары, происходящие с июня по август [6].

В данной работе рассматривалось 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 км^2, 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% от всей площади лесничеств. 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 поэтому можно говорить только или о стационарном режиме колебаний,

что характерно для лесничеств: Ленского, Верхневилюйского, 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 рисунка 4.3.

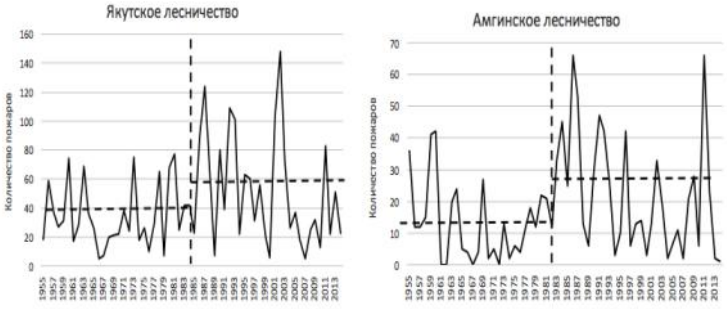

Рисунок 4.2. Динамика числа пожаров в Якутском и Амгинском лесничествах

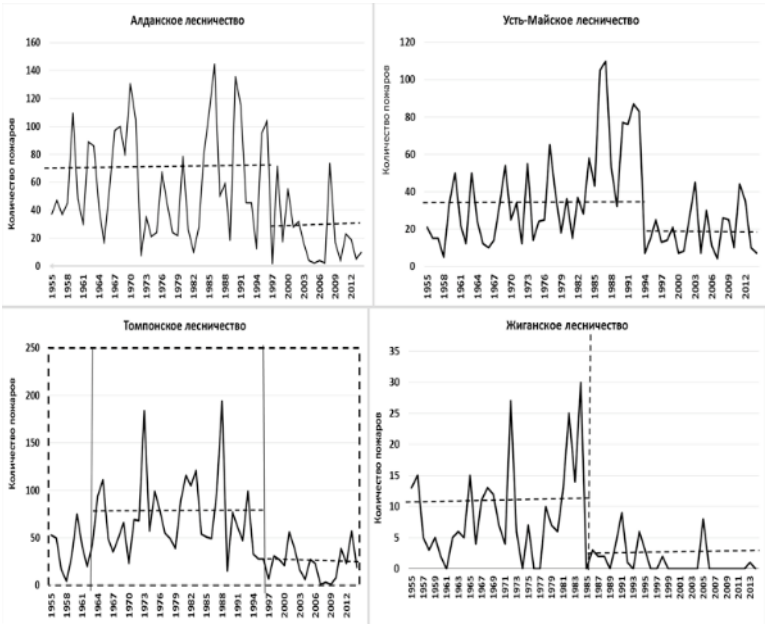

Рисунок 4.3. Уменьшение числа пожаров в некоторых лесничествах Якутии

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.

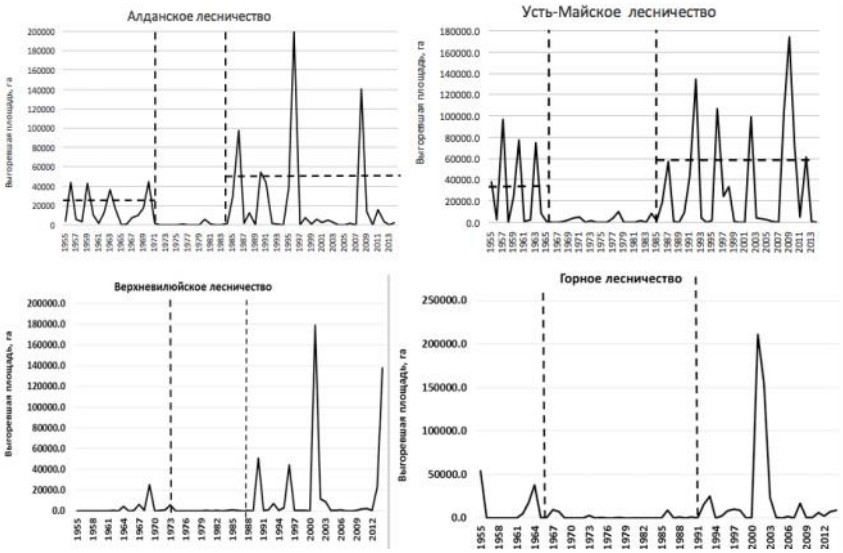

Рисунок 4.4. Многолетние ряды площадей пожаров и выделенные в них однородные периоды

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 (Индигирское, 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 ($f_{ср1}/f_{ср2}$) и наибольших (f_{max1}/f_{max2}) площадей пожаров за два однородных

периода. Кроме того, приводится и коэффициент коррел яции *R* между числом и площадью пожаров, низкие значения кот орого 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 квазиоднородных периода

Лесничество	*Период 1*	*Период 2*	*F*	f_{cp1}/f_{cp2}	f_{max1}/f_{max2}	*R*
Амгинское	1955–67	1987–2014	1,85	0,89	2,1	0,51
Верхневилюйское	1955–75	1991–2014	52,5	6,84	7,16	0,30
Вилюйское	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-Кангласское	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 пре д-ставленных в ней лесничеств , за исключением Амгинского и Усть - Майского, расчетные значе ния статистик критерия Фишера пр е-вышают критические даже при уровне значимости 1%. Хотя сре д-ние значения за два однородных периода и различаются сущес т-венно (в 2,5 раза в среднем), но их оценка по критерию Стьюдента не производилась, т.к. эти изменения сре дних связаны с неодн о-родностью 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) за весь непрерывный совместный период с 1955 по 2014 гг. и только за два квазистационарных полупериода. В результате пол учены следующие наиболее эффективные регрессионные зависим ости за однородные периоды:

$$F_{пож}=26{,}18\ T_6 - 11{,}64T_5 - 0{,}166P_8 - 4{,}438T_7 - 202{,}8$$

(Нерюнгринское, 1999-2013), R=0,93 (4.1)

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

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

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

где: $F_{пож}$ – площадь пожаров в тыс. га, $T_{лет}$, $T_{сез}$ – 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 в 3-ей главе климатической модели 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

Лесничество	Период		
	2011–2040	2041–2070	2071–2100
Вилюйское	105,9	120,7	126,7
Нерюнгринское	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), Оленек (24125, северо-запад).

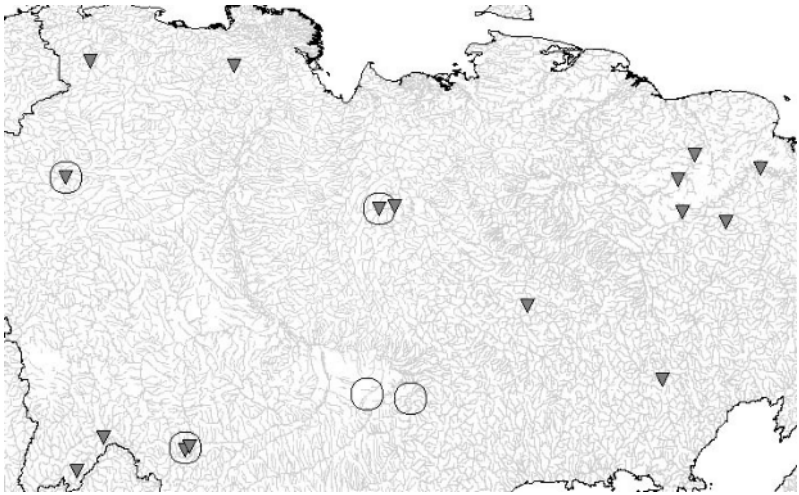

Рисунок 4.5. Схема размещения пунктов наблюдений за температурой почвы (окружности) и расходами и уровнями воды (треугольники) на территории республики Саха (Якутия)

В рассматриваемые месяцы происходит оттаивание почвы, то есть переход температуры через 0°С, 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 в стационарной модели и двух нестационарных: $\Delta_{тр}$, $\Delta_{ступ}$ – относительные отличия (в %) модели тренда и модели ступенчатых изменений от модели ста-

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

В таблице 4.3 приведены основные характеристики нестационарных моделей: $\Delta_{тр}$, $\Delta_{ступ}$; 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
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									

Код станции	$\Delta_{тр}$	$\Delta_{ступ}$	$F_{тр}$	$F_{ступ}$	*Год ст.*	*Год нач.*	*Год кон.*	*n*	*R*
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.

Из графиков, представленных на рисунке 4.6 следует, что резкое повышение температуры почвы в среднем на 1,0°С 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°С, на глубине 2,6 м – 1,0°С и на глубине 1,6 м – 1,7°С. 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°С в апреле и 1,5 –2,0°С в мае. На метеостанции Верхоянск некоторый подъем температуры с $\Delta_{ступ}$ чуть более 10,9% не является статистически значимым. На метеостанциях Охотский Перевоз и Оленек каких-либо изменений температуры почвы не установлено.

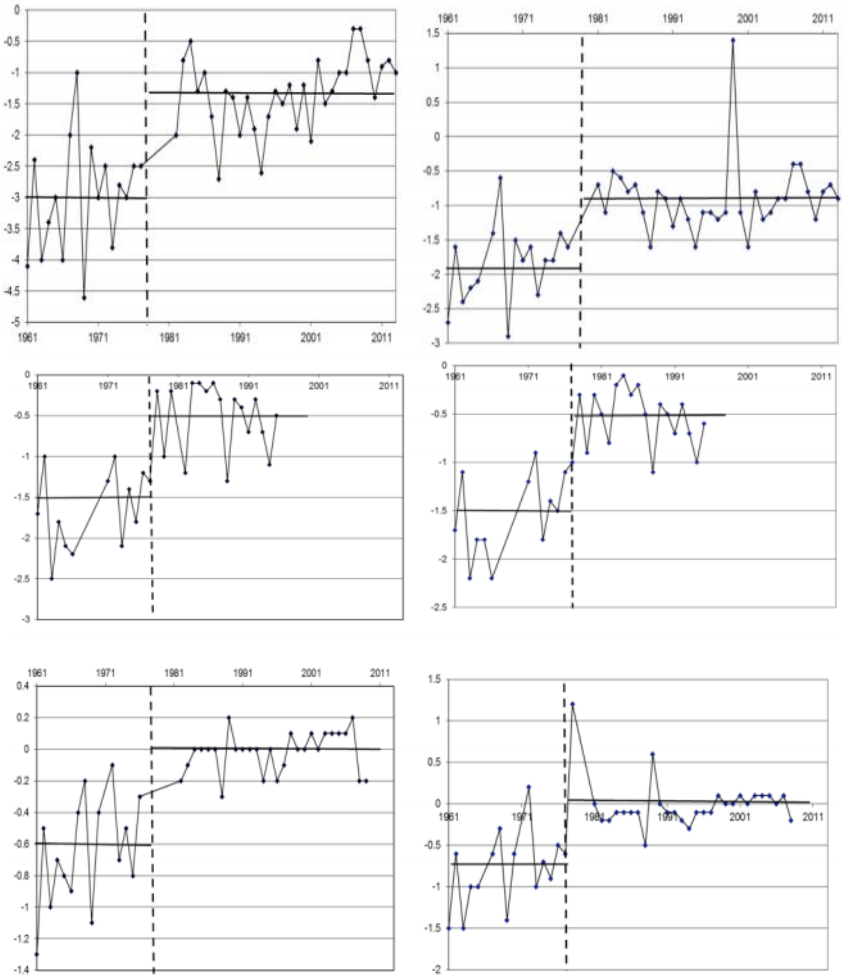

Рисунок 4.6. Динамика температуры почвы на глубинах 1,6 м, 2,4 м и 3,2 м (сверху вниз) на метеостанции Олекминск за апрель (слева) и май (справа)

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

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

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

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

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

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

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

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

$T_{3,6} = 0{,}482T_{1,6} + 0{,}29$ R=0,75, (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°С в апреле и на 0,9°С 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 веке на основе выбранной модели и среднего сценария (RCP 4), которая представлена в таблице 4.4. Основной вывод из результатов таблицы состоит в том, что хотя температура почвы и может увеличится всего на десятые доли градуса, но она уже практически достигнет нулевых отметок, что приведет к оттаиванию вечной мерзлоты, фиксируемой на глубине 3,2 м.

Таблица 4.4.

Оценка будущих значений температуры почвы на разных глубинах для метеостанции Олекминск, Южная Якутия, °С

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	Река - пункт	$\Delta_{тр}$	$\Delta_{ступ}$	$F_{тр}$	$F_{ступ}$	n	R
Максимальные в году уровни воды							
1018	р. Колыма – п. Зырянка	0,9	2,7	1,02	1,06	77	-0,13
1367	р. Березовка – с. Березовка	0,3	1,3	1,01	1,03	52	0,07
1801	р. Колыма – г. Среднеколымск	0,3	1,7	1,01	1,04	86	-0,08
1802	р. Колыма – с. Колымское	0	0,8	1	1,02	50	0,01
1805	р. Колыма – п. Черский	0,6	1,7	1,01	1,04	48	-0,11
3029	р. Лена- п. Крестовский	4	6,7	1,09	1,15	64	0,28
3030	р. Лена- г. Ленск	0,8	7,6	1,02	1,17	53	0,12
3035	р. Лена- г. Олёкминск	1,9	7,1	1,04	1,16	65	0,19
3036	р. Лена- п. Солянка	2,8	8,6	1,06	1,2	63	0,23
3405	р. Оленек – с. Оленек	0,9	2,8	1,02	1,06	77	0,14
3414	р. Яна – г. Верхоянск	0,1	3,6	1	1,08	82	0,04
3416	р. Яна – п. Батагай	0	4,8	1	1,1	60	-0,01
3491	р. Индигирка – п. Усть-Мома	21,7	19,4	1,63	1,54	50	0,62
3801	р. Анабар – с. Саскылах	0,2	0,9	1	1,02	75	-0,06
3814	р. Оленек – с. Таймылыр	1,4	4,1	1,03	1,09	57	0,17

Код	Река - пункт	$\Delta_{тр}$	$\Delta_{ступ}$	$F_{тр}$	$F_{ступ}$	n	R
3816	р. Оленек – с. Усть-Оленек	2,4	4,3	1,05	1,09	62	0,22
3864	р. Яна – п. Нижнеянск	3,2	9,5	1,07	1,22	41	-0,25
3881	р. Алазея – с. Аргахтах	2,6	7,6	1,05	1,17	50	0,22
3882	р. Алазея – с. Андрюшкино	0,9	3,8	1,02	1,08	38	-0,14
Максимальные в году расходы воды							
1367	р. Березовка – с. Березовка	1,2	1,8	1,02	1,04	33	0,15
1801	р. Колыма – г. Среднеколымск	0,4	2,4	1,01	1,05	75	-0,09
3029	р. Лена – п. Крестовский	1	2,9	1,02	1,06	65	0,14
3036	р. Лена – п. Солянка	3,9	6	1,08	1,13	65	0,28
3405	р. Оленек – с. Оленек	0,4	2,5	1,01	1,05	75	0,09
3414	р. Яна – г. Верхоянск	0,4	3,5	1,01	1,07	78	0,08
3801	р. Анабар – с. Саскылах	1,1	2,2	1,02	1,05	60	-0,15
3881	р. Алазея – с. Аргахтах	6,1	8,8	1,13	1,2	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. Аргахтак, 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.

Из графиков, представленных на рисунке 4.7, следует, что тренд роста максимальных уровней воды наиболее выражен на р.Индигирка – п. Усть-Мома ($\Delta_{тр}$ =21.7% > $\Delta_{ступ}$=19.4%), а также на р. Алазея – с. Аргахтак 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 респу блики $\Delta_{тр}$=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 [35].

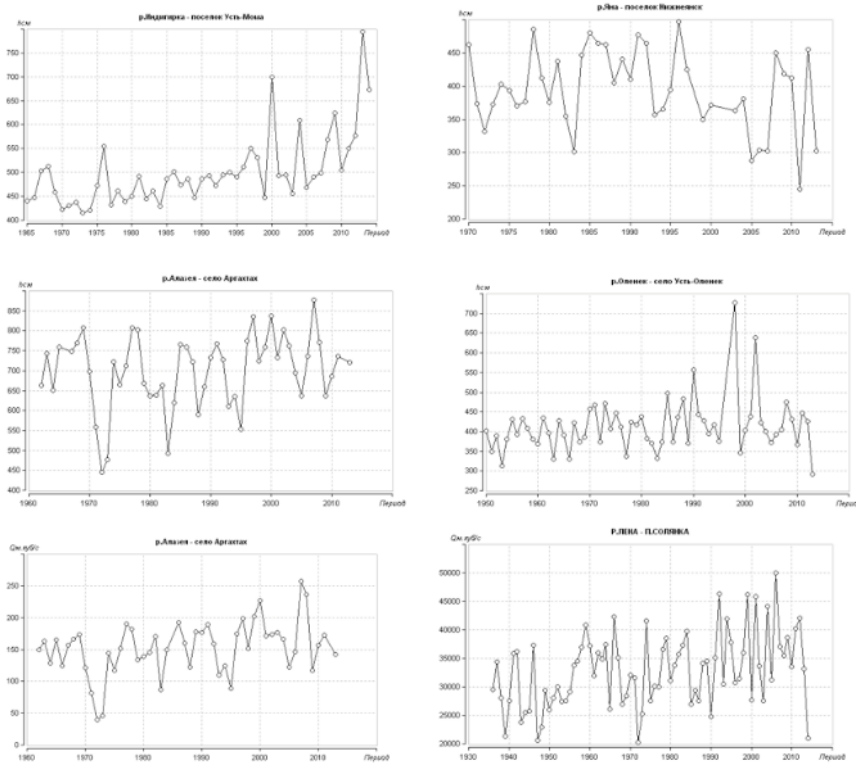

Рисунок 4.7. Временные ряды нестационарных и близких к нестационарным рядам максимальных уровней и расходов воды

4.4 Динамика характеристик ледового режима рек

Информация по характеристикам ледового режима рек Якутии была предоставлена сотрудником ФГБУ «Государственный гидрологический институт» к.т.н. Н.И.Горошковой. Ледовый режим рек относится к области криосферных явлений, которые обладают инерционностью и не сразу реагируют на внешние изменения, в том числе и климатические. Поэтому интересно рассмотреть имеет ли место проявление потепления климата для таких

характеристиках ледового режима рек, как наибольшая толщина льда, продолжительность периода ледостава, даты начала и окончания ледостава и характерные уровни воды периода ледостава (максимальные уровни начала ледостава, ледохода, заторов льда, максимальные за год уровни), расчетные значения которых имеют большое значение для проектирования и эксплуатации гидротехнических сооружений.

В качестве рассматриваемой территории выбрана центральная и южная части Якутии, где наблюдаемое повышение температуры, особенно в холодный период, наиболее значительно [12]. Схема размещения пунктов гидрологических наблюдений за характеристиками ледового режима приведена на рис. 4.8, а сведения о продолжительности наблюдений и координатах пунктов - в табл.4.6 Как следует из табл. 4.6, их продолжительность, в основном, составляет 67 лет с началом наблюдений в 1950 г. и окончание м в 2016-17 гг.

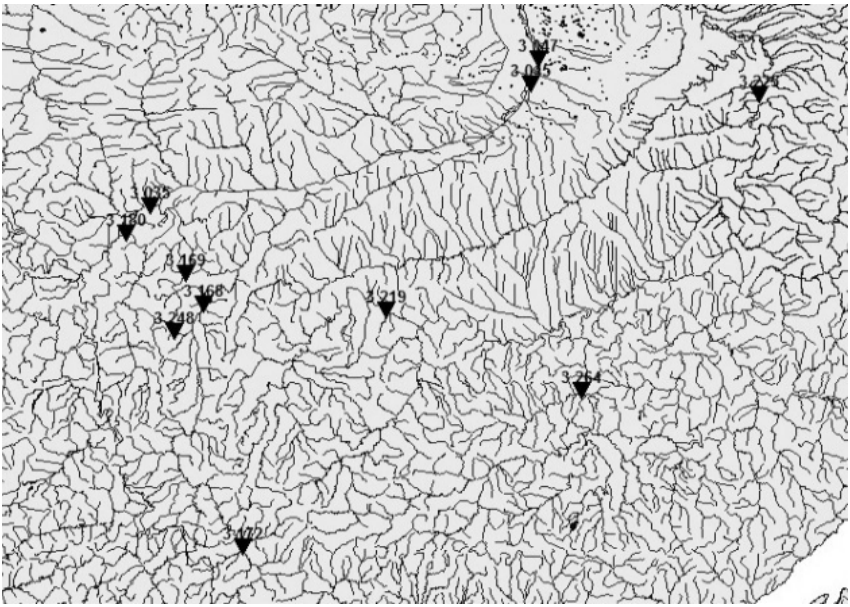

Рисунок 4.8. Карта размещения пунктов наблюдений за характеристиками ледового режима

Таблица 4.6

Характеристики пунктов и периоды наблюдений

Код поста	Река-пункт	Широта	Долгота	Период	Число лет набл.
3035	Лена - Олекминск	60,36	120,42	1950-2017	68
3045	Лена - Якутск	62,01	129,85	1962-2016	55
3047	Лена-Кангалассы	62,34	130,03	1950-2016	67
3168	Олекма - Джекимдэ	59,03	121,76	1955-2016	62
3169	Олекма - Куду-Кёль	59,45	121,32	1950-2016	67
3172	Нюкжа - Лопча	55,758	122,72	1963-2016	54
3180	Чара - Токко	59,992	119,84	1950-2016	67
3219	Алдан - Томмот	58,961	126,27	1950-2016	67
3225	Алдан - Охотский-Перевоз	61,868	135,48	1950-2016	67
3248	Тимптон - Усть-Тимптон	58,670	121,03	1953-2016	64
3264	Учур - Чюльбю	57,861	131,11	1954-2017	64

Помимо гидрологических характеристик рассматривалась также и средняя температура воздуха за зимний период на мете останции Якутск. Многолетний ряд наблюдений за зимней темпер атурой воздуха приведен на рис.4.9 , из которого даже без примен ения статистических методов видно, что температура растет, ос обенно с конца 1980х годов.

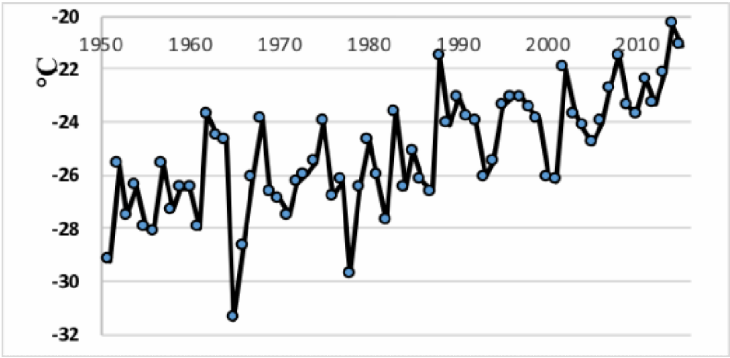

Рисунок 4.9. Многолетний ряд зимней температуры воздуха на метеостанции Якутск

Аналогичная закономерность роста зимних температур имеет место и на большинстве метеостанций республики Саха (Якутия) [24].

Климатические изменения характеристик ледового режима

Рассматривались такие основные характеристики ледового режима рек как: наибольшая толщина льда за период ледостава ($L_{макс}$), продолжительность периода ледостава в днях ($T_{лед}$), даты начала ($T_{нач}$) и окончания ($T_{кон}$) ледостава в днях от начала года. Результаты оценки стационарности дисперсий и средних значений за два полупериода по критериям Фишера и Стьюдента соответственно приведены в табл.4.7, где знаком "+" отмечено принятие гипотезы стационарности при уровне значимости α=5%, знаком "-" – отклонение гипотезы при α=1%, а "(+)" – область условного принятия гипотезы стационарности при уровне значимости, соответствующем расчетному значению статистики критерия в диапазоне 3%≤α<5% и "(-)" – область условного отклонения гипотезы стационарности при уровне значимости, соответствующем расчетному значению статистики критерия в диапазоне 1% ≤α<3%. В случае условного принятия или отклонения гипотезы стационарности в табл.4.7 приводится также и уровень значимости, соответствующий расчетному значению статистики критерия.

Таблица 4.7

Результаты оценки стационарности по критериям Фишера (Ф) и Стьюдента (Ст) параметров многолетних рядов характеристик ледового режима

Код поста	$L_{макс}$		$T_{лед}$		$T_{нач}$		$T_{кон}$	
	Ф	Ст	Ф	Ст	Ф	Ст	Ф	Ст
3035	+	+	(+) 4,6	(-)2,4	+	(-)1,6	(+)4,4	+
3045	+	+	+	-	+	(-)2,8	+	+
3047	+	+	+	+	(-)2,1	+	+	(+)3,6
3168	+	+	+	-	+	-	+	-
3169	+	+	+	+	+	+	+	(+)3,4
3172	+	+	+	(-)2,9	+	-	+	+
3180	+	+	+	+	+	+	+	(-)2,6
3219	+	+	+	+	+	+	+	(-)2,1
3225	+	+	+	+	(-)1,7	+	+	+

Код поста	$L_{макс}$		$T_{лед}$		$T_{нач}$		$T_{кон}$	
	Ф	Ст	Ф	Ст	Ф	Ст	Ф	Ст
3248	(+)4,3	+	+	+	+	+	+	(+)4,3
3264	+	+	+	+	+	+	+	+

Как следует из результатов табл.4.7, стационарными можно считать только многолетние ряды наибольшей толщины льда на реках. Для рядов остальных характеристик ледового режима гипотеза стационарности средних значений отклоняется при α=5% в 4 случаях из 11-ти для продолжительности ледостава, в 4 случаях для даты начала и в 5 случаях для даты окончания ледостава. Р ядов нестационарных по дисперсиям при α=5% всего 5, а если считать, что гипотезу стационарности можно условно принять в 3 случаях из 5, то для оставшихся двух случаев нестационарность дисперсий обусловлена влиянием отдельных аномальных экстремумов.

В целом же оценка стационарности дисперсий и средних за два одинаковых полупериода временного ряда имеет свои ограничения, т.к. год разделения на две подвыборки варьировал от 1982г. до 1989 г. из-за разной продолжительности рядов. Поэтому, если изменения начались в конце 1980х годов, то их нельзя было выявить, если дата полупериода относилась к началу 1980х.

Следующий способ оценки климатических изменений основан на применении двух моделей нестационарного среднего: линейный тренд и ступенчатые изменения. Результаты оценки эффективности нестационарных моделей приведены в табл.4.8 для трех характеристик ледостава: $T_{лед}$, $T_{нач}$ и $T_{кон}$.

В табл.4.8 даны следующие обозначения: $\Delta_{тр}$, $\Delta_{ст}$ – показатели эффективности нестационарных моделей тренда и ступенчатых изменений в %; $T_{ст}$ – год ступенчатого перехода от одного стационарного режима к другому; R - коэффициент корреляции линейного тренда. Ярким выделены случаи статистически значимых R при α=5% и эффективных моделей при $\Delta \geq 10\%$. Для многолетних рядов максимальных толщин льда получен только один случай для пункта р.Тимптон – с.Усть-Тимптон (3248), когда коэффициент корреляции модели линейного тренда статистически значим и равен R=-0,44, а также $\Delta_{тр}$=10,2% и $\Delta_{ст}$=11,3%.

Таблица 4.8.

Результаты оценки эффективности нестационарных моделей

Код поста	$T_{лед}$				$T_{нач}$				$T_{кон}$			
	$\Delta_{тр}$	$\Delta_{ст}$	$T_{ст}$	R	$\Delta_{тр}$	$\Delta_{ст}$	$T_{ст}$	R	$\Delta_{тр}$	$\Delta_{ст}$	$T_{ст}$	R
3035	**14**	**19**	1997	**-0,5**	4,7	6,2	2005	0,2	**11**	**14**	1997	**-0,4**
3045	7,8	**12**	1989	**-0,4**	1,5	7,6	1987	0,0	8	**11**	2005	**-0,4**
3047	4,6	9,2	2005	**-0,3**	0	1,6	1977	**0,3**	**13**	**15**	2005	**-0,5**
3168	**17**	**22**	1988	**-0,6**	5,1	**11**	1991	0	**12**	**12**	1988	**-0,5**
3169	3,8	5,5	1989	**-0,3**	0	1,5	1977	**0,3**	**13**	**15**	2005	**-0,5**
3172	5,9	8,4	1988	**-0,3**	3,8	8,5	1989	0,0	3	4,2	2006	-0,2
3180	4,9	7,2	1989	**-0,3**	0	2,7	1969	**0,2**	**14**	**15**	1997	**-0,5**
3219	8,2	**13**	1990	**-0,4**	3	9,1	2003	**0,3**	9	8,4	2005	**-0,4**
3225	**11**	**14**	1996	**-0,5**	4,9	**12**	1995	0,1	8	9,4	1966	**-0,4**
3248	3,5	5,3	2006	**-0,3**	0,8	5,9	2006	0	4	6,8	1966	**-0,3**
3264	5,3	**14**	1998	**-0,3**	0	7,5	1974	0,2	**12**	**13**	1970	**-0,5**
сред-нее	7,8	12			2,2	6,6			10	11		

В целом из анализа результатов табл.4.8 можно сделать вывод, что имеет место уменьшение периода ледостава, что связано в основном с более ранней датой окончания ледостава и в меньшей степени с наступлением более поздней даты начала ледостава. На отдельных реках, таких как Лена, Чара, Учур, изменение характеристик ледового режима существенно, а на других (Тимптон, Нюкжа) еще мало проявляется. Также можно сделать и второй вывод, что в случае нестационарных моделей модель ступенчатых изменений эффективнее, чем линейного тренда, т.к. средние значения $\Delta_{тр} < \Delta_{ст}$. Примеры нестационарных рядов продолжительности ледостава, дат начала и окончания ледостава приведены на рис.4.10-4.12.

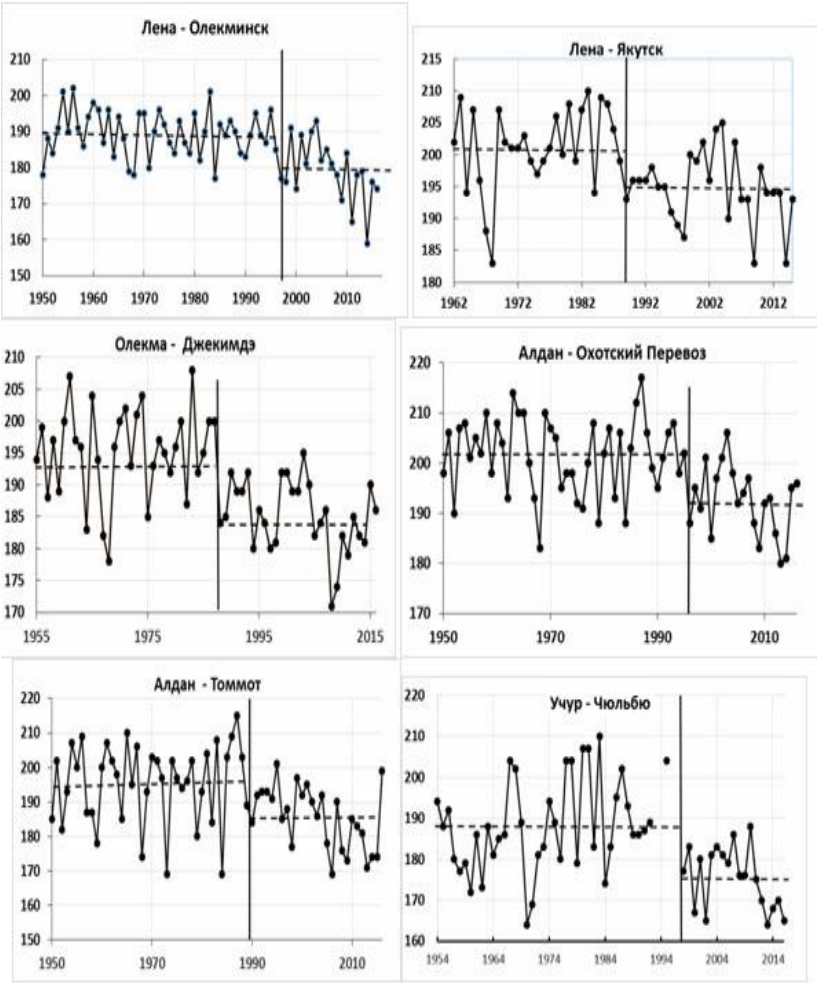

Рисунок 4.10. Нестационарные временные ряды продолжительности периода ледостава (в днях)

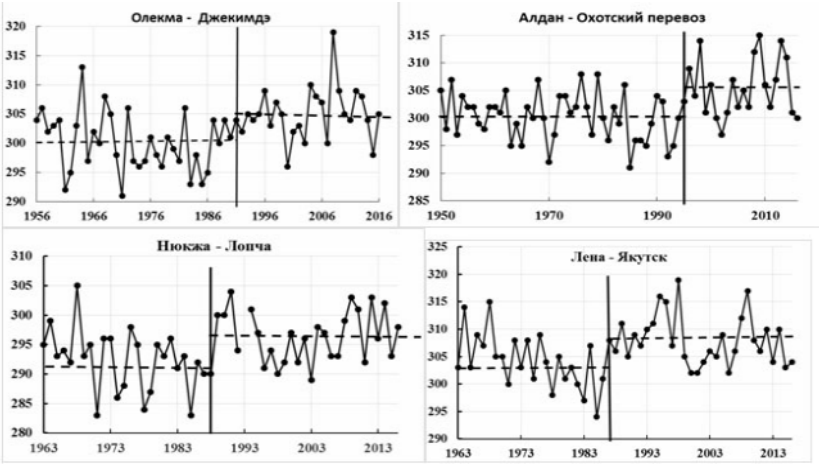

Рисунок 4.11. Нестационарные временные ряды дат начала ледостава (в днях от начала года)

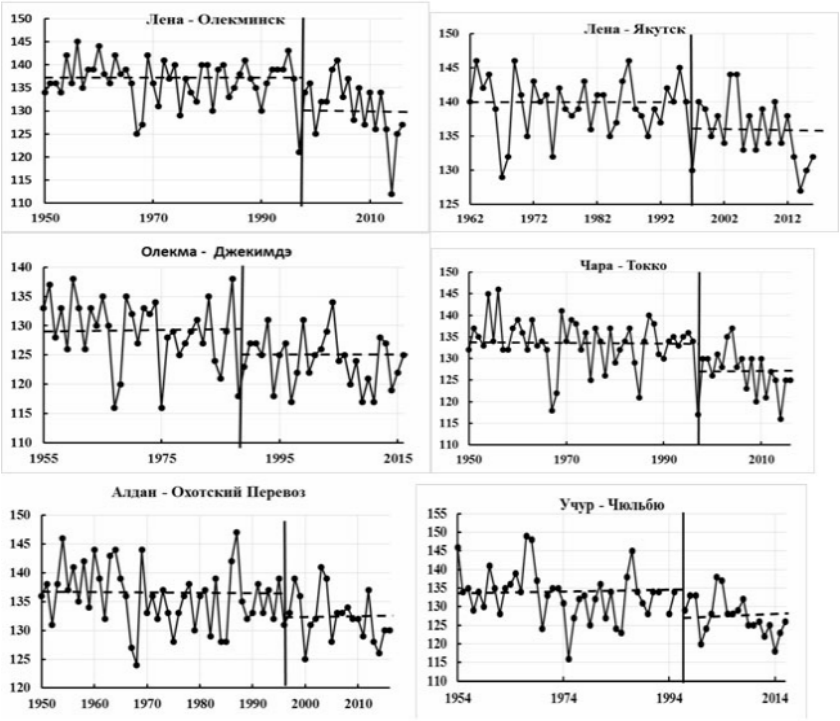

Рисунок 4.12. Нестационарные временные ряды дат окончания ледостава (в днях от начала года)

На основании установленных нестационарных моделей для характеристик ледового режима были вычислены и количестве нные изменения продолжительности ледостава и дат его начала и окончания, которые приведены в табл.4 .9 для модели ступенчатых изменений ($\Delta_{ст}$) и тренда ($\Delta_{тр}$). В той же табл.4 .9 приводится и среднее квадратическое отклонение (СКО) многолетнего ряда (σ) и жирным выделены ситуации, когда установленные изменения пр евышают СКО.

Таблица 4.9

Климатические изменения основных характеристик ледостава (в днях)

Код поста	$T_{лед}$			$T_{нач}$			$T_{кон}$		
	$\Delta_{ст}$	$\Delta_{тр}$	σ	$\Delta_{ст}$	$\Delta_{тр}$	σ	$\Delta_{ст}$	$\Delta_{тр}$	σ
3035	**-10**	**-14**	8,4	+3	**+5**	4,8	**-7**	**-9**	6,0
3045	**-7**	**-8**	6,7	+3	+3	5,0	-4	**-6**	4,6
3047	-7	**-9**	7,7	+1	0	6,2	**-6**	**-8**	4,7
3168	**-10**	**-15**	8,1	+5	**+6**	5,3	-5	**-9**	5,8
3169	-5	-7	7,7	+1	0	5,8	-4	**-8**	4,7
3172	-6	**-9**	7,9	+4	+5	5,1	-2	-4	5,7
3180	-8	**-11**	9,6	+1	0	7,2	**-7**	**-11**	6,3
3219	-9	**-15**	11,6	+6	+8	9,1	-3	**-8**	5,7
3225	**-10**	**-13**	8,5	**+6**	**+6**	5,2	-4	-7	5,2
3248	-9	-10	11,4	+7	+4	9,1	-2	-6	7,1
3264	**-13**	**-12**	11,8	+7	0	9,8	-6	**-11**	6,8
сред нее	8,5	11,2	9,0	4,5	3,4	6,6	4,5	7,9	5,7

Приведенные в табл.4 .9 результаты свидетельствуют о том, что продолжительность ледостава уменьшается на 5 -15 дней в зависимости от реки и выбранной нестационарной мод ели. При этом, по модели линейного тренда получаются более завышенные значения, в среднем на 2 -3 дня, т.к. она учитывает отдельные эк стремумы в начале и конце ряда. Превышение СКО имеет место в 4 случаях для модели ступенчатых изменений и в 9 случаях для модели линейного тренда, двойного превышения СКО (2 сигма) не наблюдается ни в одном случае. Дата начала ледостава наступает, в среднем на 3 -4 дня позже, хотя вариация существенна и соста вляет от 0 до 8 дней. Это увеличение практически меньше естес твенной изменчивости или сопоставимо с ней. Дата окончания л е-

достава наблюдается раньше на 2-11 дней (в среднем на 5-8 дней), причем превышение СКО имеет место в 3 случаях для модели ступенчатых изменений и 8 случаях для модели линейного тренда. Двойного превышения СКО не было ни в одном случае.

Климатические изменения характеристик уровенного режима

Помимо продолжительности и дат рассматривались также и характерные уровни зимнего и весеннего периодов: максимальные уровни начала ледостава ($H_{лдст}$), максимальные уровни ледохода ($H_{лдх}$), максимальные заторные уровни ($H_{зат}$), а также для сравнения с ними – максимальные в году уровни воды ($H_{год}$), которые обычно имеют место в период весеннего половодья.

Результаты оценки эффективности нестационарных моделей приведены в табл.4.10 для трех характерных уровней $H_{лдст}$, $H_{лдх}$ и $H_{год}$.

Таблица 4.10

Результаты оценки эффективности нестационарных моделей уровней воды

Код поста	$H_{лдст}$				$H_{лдх}$				$H_{год}$			
	$\Delta_{тр}$	$\Delta_{ст}$	$T_{ст}$	R	$\Delta_{тр}$	$\Delta_{ст}$	$T_{ст}$	R	$\Delta_{тр}$	$\Delta_{ст}$	$T_{ст}$	R
3035	1,3	7,6	2005	0,2	0,0	3,9	97	0,0	1,7	6,6	1992	0,2
3045	0,4	0,5	1985	0,1	0,9	5,6	98	0,1	1,3	6,2	1998	0,2
3047	5,5	**13**	1999	**0,3**	2,2	9,1	98	0,2	3,6	**12**	1998	0,2
3168	9,6	**13**	1994	**0,4**	0,1	1,6	94	0,1	0,5	3,1	2001	0,1
3169	2,6	4,8	1998	0,2	0,0	1,1	65	0,0	0,7	2,4	1996	0,1
3172	**16**	**14**	2007	**0,5**	2,1	4,5	01	0,1	0,6	2,2	1981	0,1
3180	**15**	**25**	2003	**0,5**	2,9	**10**	98	0,2	1,0	3,2	2006	0,1
3219	8,8	**16**	1997	**0,4**	0,1	0,6	96	0,1	0,2	2,2	1992	0,1
3225	2,8	7,5	2000	0,2	0,2	2,8	96	0,1	0,0	0,8	1994	0,0
3248	**12**	**18**	1998	**0,5**	0,1	1,9	97	0,0	0,6	2,3	1974	0,1
3264	1,3	9,2	2002	0,2	0,6	3,6	97	0,1	0,4	2,1	1984	0,1
среднее	6,8	12			0,8	4,1			1,0	3,9		

Из данных табл.4.10 следует, что нестационарность проявляется только в половине многолетних рядов максимальных уровней

ней начала ледостава, которые увеличиваются. Для других м аксимальных уровней (ледохода и максимальных в году) проявление нестационарности средних практически отсутствует. Временные нестационарные ряды максимальных уровней нач ала ледостава приведены на рис.4.13.

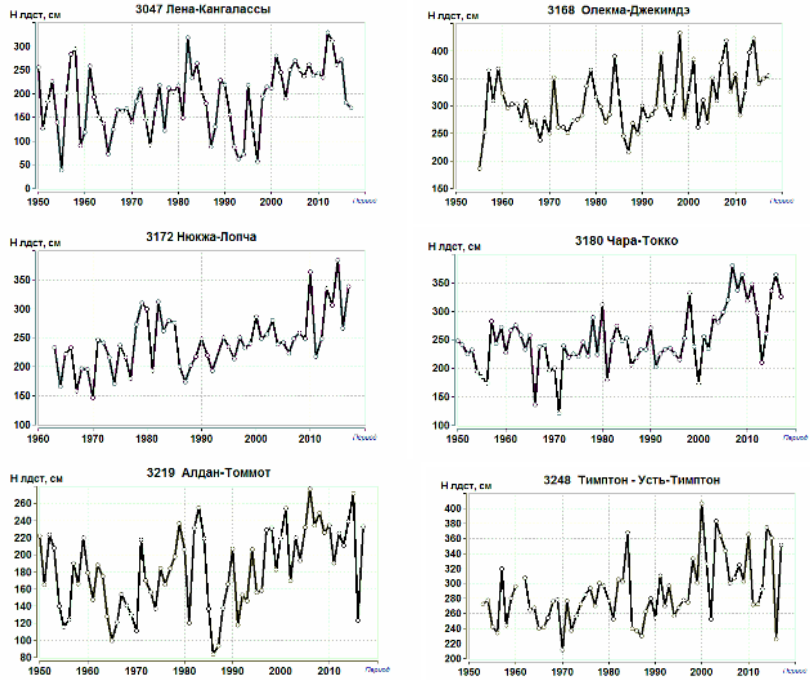

Рисунок 4.13. Нестационарные временные максимальных уровней начала лед о-става (в см)

Средние значения максимальных уровней начала ледостава для нестационарных рядов, приведенных на рис.4.13 , возросли на 51-83 см в зависимости от пункта наблюдений, что во всех 6 сл у-чаях превышает СКО, но максиму м в 1,5 раза (для пункта 3180 Чара – Токко).

Поэтому проверка на стационарность при таком огран и-ченном материале свидетельствует об отсутствии статистически значимой стационарности в средних значениях этих рядов.

В результате выполненного исследования характеристик ледового режима на реках республики Саха (Якутия) можно сделать следующие выводы:

1. Зимняя температура воздуха растет (рис.4.9), особенно с середины 1980х годов, что подтверждено исследованиями климатических характеристик во второй главе.

2. Максимальная толщина льда на реках пока остается практически стационарной и статистически значимые ее уменьшения отсутствуют.

3. Продолжительность ледостава на реках уменьшилась на 1 -2 недели в зависимости от конкретного речного водосбора и это уменьшение превышает естественную изменчивость, хотя пока и ненамного (в среднем на 20%), но наблюдается в 80% случаев.

4. Продолжительность ледостава стала меньше в основном за счет более ранней даты окончания ледостава: в среднем на 6 -8 дней при вариации от 2 до 11 дней. При этом превышение естественной изменчивости имело место в 72% случаев.

5. Дата начала ледостава становится несколько более поздней, но ее смещение составляет в среднем всего 3 -4 дня с максимумом в 8 дней, а превышение над естественной изменчивостью имеет место всего в 18% случаев и не превышает ее более, чем на 15%.

6. Из характерных зимних уровней воды нестационарность проявляется лишь в многолетних рядах максимальных уровней начала ледостава, которые увеличиваются, и хотя это увеличение имеет место только для половины рядов и превышает естественную изменчивость максимум на 50%, но это существенно повышает значимость осеннего фактора в процессах образования максимальных заторных уровней.

7. Установлено, что в случае нестационарных средних модель ступенчатых изменений является более эффективной для временных рядов, чем модель линейного тренда, которая к тому же за счет учета экстремумов на краях ряда завышает сами эти изменения на 20-30%.

4.5 Выводы по климатическим индикаторам

В целом по результатам исследования климатических и н-дикаторов 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 п ожаров;
- полученные эмпирические зависимости, которые можно испол ь-зовать 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;
- оценка будущей выгоревшей площади на основе выбранных климатических моделей по температуре воздуха и атмосферным осадкам по сравнению с текущими значениями выгоревшей пл о-щади показала ее рост;
- температуры почвы выросл и ступенчато в среднем на $1,0\ ^0$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 индикатор ом оттаивания мерзлоты;
- установлены эмпирические зависимости, связывающие темпер а-туры почвы на разных глубинах и с температурой воздуха, кот о-рые показывают рост температур почвы на 0,1 –0,3^{0}C до конца 21 века, что приведет к оттаиванию мерзлоты на глубине 3,2 м;
- рост в гидрологическом отклике климата для рядов максимал ь-ных 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;
- максимальная толщина льда пока остается без изменений, а пр о-должительность ледостава на реках Якутии уменьшилась в сре д-нем на неделю.

ГЛАВА 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 [45].

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 зда-

ний 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°С 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 [65].

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 участившиеся 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 [3, 4].

5.2 Оценка уязвимости экосистем Республики Саха (Якутия) к возможным климатическим воздействиям

Приведенные известным якутским климатологом М.К. Гавриловой данные свидетельствуют о том, что к середине 21-го 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 свя-

зи с наблюдаемым потеплением климата. Это подтверждается и наблюдаемым в настоящее время расширением ареала многих ранее обитавших в регионе видов, 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, альвекоккоз, эхиноккоз 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 конце 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 [38].

5.3 Разработка региональных стратегий смягчения последс т-вий и адаптации к изменениям климата экономики, инфр а-структуры и населения Республики Саха (Якутия)

В предыдущих главах монографии была представлена оценка будущих изменений климата Якутии по двум к лючевым метеопараметрам – температуре воздуха и атмосферным осадкам, которая показала рост осадков, и то, что температура будет пов ышаться больше в холодный период года (зима), а рост весенних, летних и осенних температур будет существенно ниже (ниже зи мних практически в два раза). Исходя из этого катастрофических последствий изменения климата ожидать не следует, но опред еленные 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 р егиона.

Здоровье населения: оценивая влияние современного и зменения климата на здоровье можно выделить три главных факт ора.

Первый – это прямое воздействие, связанное с изменением температурного режима. Оно может быть позитивным в результ ате 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 д ополнительной смертности.

К косвенному, иначе опосредованному негативному, во з-действию относится снижение качества воздуха, прежде всего из - за поступления в атмосферу прод уктов 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 особе нно важным, учитывая описанные р анее особенности эпидемиологической обстановки региона, связа нные 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 частности: 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 для которого 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 другие).

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 энергосбереже-

ния, 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.

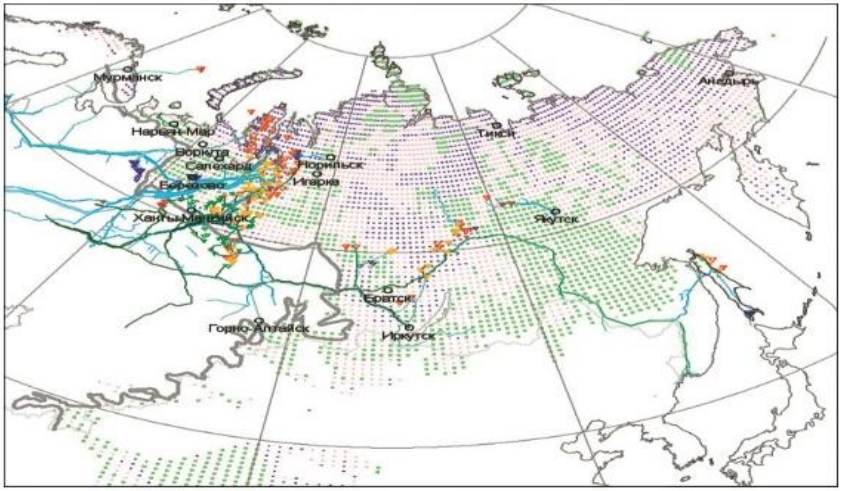

Рисунок 5.1. Индекс геокриологической опасности для объектов на многолетней мерзлоте

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. Основной 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 предыдущей главе. 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 XXIв. 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 монитори нга и достоверного прогноза, и эффективной ликвидации очагов пожаров, болезней и вредных насекомых.

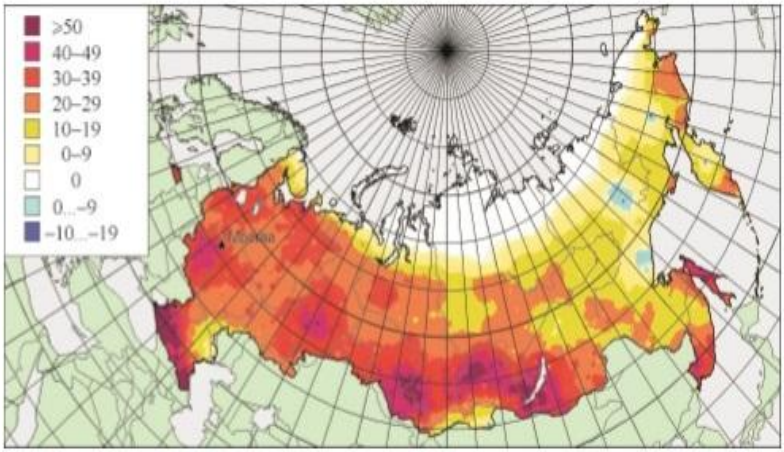

Рисунок 5.2. Перспективная оценка изменения среднего числа пожароопасных суток в году (май-сентябрь) за 2080–2099-е гг. по сравнению с 1981–2000-и гг.

Среди основных мероприятий по адаптации лесного хозя йства республики к изменению климата можно выделить следу ющие:

- 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 широкома сштабных нарушений в лесах, в т ч. адаптацию структуры лесных ландшафтов к будущему климату;
- внедрение эффективной системы лесного мониторинга;
- разработку нового и усовершенствование существующего закон одательства и институциональных структур лесоуправления, орие нтированных на вызовы меняющегося климата;
- целесообразную международную кооперацию.

И, наконец, **отрасль жилищно-коммунального хозяйст ва (далее ЖКХ).** С целью адаптации к изменениям климата в сф е-

ре ЖКХ необходимо безотлагательно внести коррективы в норм ативные документы СНиП, государственные стандарты, а также технические регламенты. В частности, требует срочного пер есмотра глава СНиП «Строительная климатология», к которой но рмативные квантили продолжительности и температуры отоп ительного периода должны быть заменены с учетом уже происх одящего сокращения его продолжительности в связи с потеплением климата.

Схематично для основных отраслей экономики Республики Саха (Якутия), таких как: сельское хозяйство, лесное хозяйство, здравоохранение, строительный сектор, гидроэнергетика в таблице рисунка 5.3 показаны взаивосвязи между установленными измен ениями в климатических характеристиках (температура и осадки), их влиянием на климатические индикаторы и перечнем мер, которые необходимы для адаптации.

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	✓ 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: - рост – снижение риска пожаров; - падение – возрастание риска лесных пожаров в Западной Якутии, которая уже сейчас является областью высокого риска пожаров.	Незначительный прирост площади лесных пожаров в будущей перспективе	✓ 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	Рост / Снижение – зависит от ситуации (экстремальные метеоявления, сильные ливни / неблагоприятное)	Риск здоровью населения во время пожароопасных сезонов (смог пожаров) и паводков (угроза затопления жилых территорий)	✓ Принятие планов по укреплению эпидемиологического надзора за чувствительными к климату инфекционными заболеваниями и внедрение соответствующих мер профилактики.

Отрасль экономики	Климатические факторы, оказывающие воздействие / характер воздействия		Климатические индикаторы, оказывающие воздействие	Меры по адаптации
Строительный сектор	Рост среднегодовых температур / неблагоприятное воздействие – может быть вызвано протаивание вечной мерзлоты	-	Согласно проведенным расчетам в рамках данного диссертационного исследования – произойдет рост температур почв в Южной Якутии	✓ Принятие новых технических регламентов о безопасности зданий и сооружений, который требует, 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.
Гидроэнергетика	Рост весенних температур / неблагоприятное – возрастание риска паводков	Рост зимних осадков / 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.

Рисунок 5.3. Выявленные изменения в климатических факторах и климатических индикаторах, воздействующие на основные отрасли экономики Республики Саха (Якутия), и необходимые меры для адаптации к изменениям.

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 в ее северных территориях, 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 Яку-

тии, 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 определенны. 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.) [27]. 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 ан а-

лиз и выявление неопределенностей, включая анализ уязвимых зон и анализ возможных рисков);

- оценка адаптивной стратегии (определение целей, указание на важность последствий изменения климата, определение адаптац ионных мер, оценка неопределенностей, формулирование и колич ественное измерение альтернативных стратегий, разработка рек омендуемых адаптационных мер).

При этом необходимо заметить, что не существует строг ого официально задокументированного алгоритма по разработке адаптивных климатических стратегий. Для разработки климатич еской программы для Якутии н аибольший практический интерес представляет опыт северных стран, имеющих схожий суровый климат, а также экономику и инфраструктуру, построенную на вечной мерзлоте. В разработке климатической программы для р егиона исследования были использованы следующие ре гиональные 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, Ca nada;
- Changing Climate, Changing Communities. Gui de and Workbook for Municipal Climate Change Adaptation, ICLEI Project, Canada;
- Dawson Climate Change Adaptation Plan. Community Adaptation Project, Dawson Adaptation P roject, Yukon, Canada [66, 70, 77].

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

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

- описание проблем и опасностей, появившихся или усилившихся вследствие изменения климата в регионе иссл едования;
- характеристика уровня подготовленности, которая характеризует регион исследования относительно изучаемой проблемы и сопр яженных с ней опасностей;

- описание имеющихся и возможных будущих проблем или опасностей, которые могли бы вызвать серьезные последствия в будущем и 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 международный опыт и опираясь на существующие стандарты МГЭИК, была разработан макет климатической программы для Якутии.

Макет климатической программы для Республики Саха (Якутия)

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 Здравоохранение – вся территория республики.

Глава 3. Воздействие на инфраструктуру/ ключевые отрасли хозяйства региона

3.1 Лесное хозяйство.

3.2 Здравоохранение.

3.3 Строительство и наземный транспорт.

3.4 Гидроэнергетика.

Глава 4 Экономическая оценка потенциального воздействия изменения климата.

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

Глава 5. Приоритетные адаптационные меры.

Перечень мер для каждой отрасли экономики и каждого субъекта Федерации в зависимости от вероятности воздействия изменений климата.
Заключение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования получены следующие результаты:

1. Сформированы уникальные базы данных географической информации – региональная база данных климатической информации, базы данных лесопожарной динамики и паводковой активности для Якутии.
2. Проведен анализ однородности эмпирических распределений температурных характеристик и характеристик осадков на территории Якутии, который показал практическое отсутствие в них неоднородных экстремумов за исключением отдельных аномальных значений, все случаи которых были детально проверены и выявлены причины установленной неоднородности.
3. Проведена процедура восстановления пропусков наблюдений и приведения непродолжительных рядов к многолетнему периоду, в результате продолжительность рядов температуры воздуха была увеличена практически в два раза до 132 лет в среднем, в свою очередь ряды осадков удалось удлинить в среднем на 17 лет. Для проведения достоверной процедуры статистического моделирования была проведена оценка однородности и стационарности восстановленных рядов температуры и осадков, что позволило сформировать непрерывные многолетние ряды наблюдений за температурой воздуха и атмосферными осадками для Якутии.
4. Выполнено статистическое моделирование многолетних рядов температуры воздуха. В качестве математического инструмента для проведения процедуры моделирования были выбраны три модели временных рядов: базовая модель стационарной выборки и две конкурирующие нестационарные модели линейного тренда и ступенчатых изменений. Результаты моделирования показали, что:

- многолетние ряды среднемесячных температур воздуха на территории Якутии не являются стационарными и процент нестационарных рядов увеличивается в последние годы;
- из двух рассмотренных нестационарных моделей модель ступенчатых изменений является более эффективной для описания межгодовых изменений температуры воздуха по сравнении с ши-

роко применяемой в настоящее время моделью линейного тренда, при этом ступенчатый рост относится к 1960 -1980-м гг.;

- во внутригодовом распределении нестационарности имеют место два максимума: в переходный период от зимы к лету (апрель-июнь) и в начале зимнего периода (октябрь -ноябрь), при этом территориально весенний и осенний максимумы нестационарности располагаются в разных частях территории Якутии: весенне - летний – на юге, осенне-зимний – на северо-востоке.

6. Аналогичная процедура статистического моделирования временных рядов для осадков показала следующие результаты:

- многолетние ряды среднемесячных атмосферных осадков на территории Якутии также 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 сравнении с моделью линейного тренда;

- ступенчатый рост/ ступенчатое снижение атмосферных осадков относится в 1990 -м гг.;

- во внутригодовом распределении нестационарности на ибольшие 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 вывод о том, что атмосферные осадки в Якутии более однородны по сравнению с температурой воздуха в пространстве и времени, но в целом они меняются до противополож - ных 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.

7. Применение климатических моделей и сценариев для оценки будущих значений температуры воздуха на территории Якутии позволило сделать следующие выводы.

- Сравнение данных наблюдений и моделирования за совместный период дает невысокие коэффициенты корреляции между ними. Также оно показывает тенденцию к завышению/ занижению значений климатических параметров в зависимости от сезона года для всех станций, выбранных для анализа, что было устранено при помощи введения поправочных коэффициентов.

- В зависимости от метеостанции и сезона года наилучшими являются разные модели климата. Как правило, при применении наиболее эффективных моделей погрешности в нормах температур составляют менее 1-2°С для теплого периода года. Зимой погрешности в нормах могут составлять и по наилучшим моделям до 4-6°С. В целом наиболее эффективной для территории республики можно признать английскую модель HadGEM2 Хэдли Центра, которая показала себя наиболее эффективной в 50% случаев.

- Будущие проекции температуры для Якутии следующие:

- наибольший рост температуры следует ожидать зимой до 4 –6°С в последней трети XXI века по среднему сценарию RCP4.5;
- 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°С до 5.1°С (в среднем 2 –3°С, то есть в два раза меньше, чем зимних), а наибольшие возможные значения роста по сценарию RCP8.5 могут достигать 6-8°С;
- 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°С зимой и на 2–3°С в теплый период года.

8. В целом по всей территории Якутии в будущем произойдет рост осадков. Наибольший рост количества осадков ожидается в летний период, на некоторых станциях количество осадков увеличится в два раза. При этом для станции Вилюйск в Западной Якутии ожидается значительное снижение количества осадков в летний период, что может увеличить риск летных лесных пожаров в данном районе.

9. Результаты анализа климатических индикаторов показали следующее.

9.1 По лесным пожарам:

- дисперсия площадей пожаров в центральных и юго-восточных лесничествах Якутии возросла с конца 20-го, начала 21-го веков, 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, которые дают увеличение площадей пожаров в 21 веке.

9.2 По температуре почвы на разных глубинах:

- температуры почвы выросли ступенчато в среднем на 1°С в конце 1970-х – начале 1980-х гг. 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 вечной мерзлоты;

- установлены эмпирические зависимости, связывающие температуры почвы на разных глубинах и с температурой воздуха, которые при применении климатических сценариев показывают рост температур почвы на 0,1-0,3°С до конца 21 века, что приведет к оттаиванию вечной мерзлоты на глубине 3,2 м.

9.3 Гидрологическая оценка:

- рост в гидрологическом отклике климата для рядов максимальных расходов и уровней воды пока практически не наблюдается за исключением отдельных случаев, что, однако, может быть связано и с локальными причинами, характерными для изменения уровня воды.

9.4. Ледовый режим рек: максимальная толщина льда пока остается без изменений, а продолжительность ледостава на реках Якутии уменьшилась в среднем на неделю.

10. Изучены и проанализированы теоретические основы, законодательная база и успешные примеры адаптационных стратегий к проявлениям современного изменения климата северных стран как предпосылка для создания макета регионального климатической программы адаптации для Республики Саха (Якутия).

11. Конечным результатом проведенного анализа стала подготовка макета региональной климатической стратегии для Якутии,

которая оценивает предполагаемые последствия изменения клим а-та на территории республики и возможные меры по адаптации к ним.

Литература

1. Анализ изменения природно-климатических условий Якутии по начало следующего столетия// Природные условия осваиваемых регионов Сибири. – Якутск: ИМЗ СО АН СССР, 1987. – с.146–159.
2. Бокс, Дж. Анализ временных рядов. – М. : Мир, 1974. – 406 с.
3. 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.
4. 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.
5. Варламов, С. П. Температурный режим грунтов мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии. – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2002. – 218 с.
6. 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
7. Всемирная программа исследований климата: достижения, виды деятельности и задачи/ А Дж. Басалачи, Гассем Р. Асрем // Бюллетень ВМО. – 2009. – №58 (3). – 223 с.
8. 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.
9. Гаврильев, П. П. Мерзлотно-экологические особенности таежных агроландшафтов Центральной Якутии. – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2001. – 196 с.
10. 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.
11. Григорьев, М. Н. Обзор современных изменений климата и природной среды в Республике Саха (Якутия). Якутск : Изд-во «Хамелеон», 2010. – 18 с.
12. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Ожидаемые и наблюдаемые изменения климата России: температура воздуха. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2012. – 194 с.
13. 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.
14. Доклад «Рамочная конвенция ООН об изменении климата. Первые десять лет». Подготовлен информационной службой Секретариата РКИК, РКИК ООН, 2004. – 99 с.

15. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ. – М. : Статистика, 1973. – 392 с.
16. Дучков, А. Д., Деменко, Д. Ю., Балобаев, В. Т., Головано ва, И. В., Дорофеева, С. П. Реконструкция палеоклиматических условий Урало -Сибирского региона в позднем плейстоцене и голоцене по геотермическим данным// Гл обальные и региональные изменения климата и природной среды позднего кайнозоя в Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – с.405– 443.
17. Закс, Л. Статистическое оценивание. – М. : Статистика, 1976. – 598 с.
18. 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.
19. Изменения климата и их последствия// География в Якутии: наука и образ ование. Материалы II Форума географов Якутии к 70 -летию со дня рожд ения С. Е. Мостахова. – Якутск: Изд-во ЯГУ и Института повышения квалифи кации работников образов ания, 2005. – с.43– 46.
20. Изменение климата, 2014 г. Последствия, адаптация и уязв имость. Часть А: Глобальные и секторальные аспекты. Часть В: Региональные аспекты. Вклад Рабочей группы II в подготовку Пятого оценочного доклада М ГЭИК (англ.) – 1785 с.
21. Изменение климата, 2014 г. Смягчение воздействий на изменение клим ата. Вклад Рабочей группы III в подготовку Пятого оценочного доклада МГЭИК (англ.) – 1435 с.
22. Кириллина, К.С. Современные тенденции изменения климата Респу блики Саха (Якутия). Ученые записки Российского государственного гидромете орологического университета №30. Научно -теоретический журнал. – СПб. : РГГМУ, 2013. – 222 с., с.69–77.
23. Кириллина, К.С. Тенденции изменения климата Республики Саха (Як утия). Влияние изменений климата на природные процессы криолитозоны// Вопр осы географии Якутии. Вып.11/ Ответственные редакторы А.Н. Федоров, Р.Н. Иванова. – Якутск: Издание «СМИК -Мастер», 2013. – 182 с. – 115–121.
24. Кириллина, К. С., Лобанов, В. А. Оценка совр еменных климатических изм енений температуры воздуха на территории Республики Саха (Якутия). Уч еные записки Российского государственного гидрометеорологического ун иверситета №38. Научно -теоретический журнал. – СПб. : РГГМУ, 2015. – 276 с., с.137–151.
25. Кириллина, К. С., Лобанов, В. А. Оценка современной изменчивости атм осферных осадков на территории Республики Саха (Якутия). Ученые запи ски Российского государственного гидрометеорологического университета № 39. Научно-теоретический журнал. – СПб. : РГГМУ, 2015. – 250 с., с.74–86.
26. Кириллина, К. С., Лобанов, В. А., Сердитова, Н. Е. Оценка будущего кл имата Республики Саха (Якутия). Ученые записки Российского государстве нного гидрометеорологического университета № 40. Научно -теоретический журнал. – СПб.: РГГМУ, 2015. – 298 с., с.113–126.
27. Комплексные климатические стратегии для устойчивого развития реги онов Российской Арктики в условиях изменения климата (Модельный пример Мурманской области). – М. : Программа развития ООН в России, Российский региональный экологический центр, 2009. – 88 с.

28. Краснов, А. М. Политика в области глобальных климатических измен ений: теоретико-экономический анализ: автореф. дис. канд. экон. наук : 08.00.14 / Краснов Алексей Михайлович, Спб., 2010 г. – 19 с.
29. Лобанов, В. А., Лемешко, Н. А., Жильцова, Е. Л., Горлова, С. А., Р енева, С. А. Методы восстановления многолетних рядов температуры воздуха. // Сборник работ по гидрологии, 2004, № 27, с.54 –68.
30. Лобанов, В. А., Лемешко, Н. А., Жильцова Е. Л., Горлова С. А., Рен ева С. А. Восстановление многолетних рядов температуры воздуха на Европейской территории России. // Метеорология и гидрология, 2005, № 2, с.5 –14.
31. Лобанов, В. А. Практикум по климатологии. Ч.1. – СПб. : РГГМУ, 2011. – 145 с.
32. Лобанов, В. А. Практикум по климатологии. Ч. 2. – СПб. : РГГМУ, 2012. – 180 с.
33. Лобанов, В. А. Проявление современных изменений климата на террит ории Костромской области. – Кострома : ФГБУ «Костромской центр по гидром етеорологии и мониторингу окр ужающей среды», 2013. – 179 с.
34. Лобанов, В. А. Определение зон климатического риска на территории Ро ссии при современном изменении климата. – СПб. : РГГМУ, 2013. – 164 с.
35. Лобанов, В. А., Кириллина, К. С. Отклик климатических индикаторов на с овременное потепление климата в Республике Саха (Якутия). Научный жу рнал «Географический вестник Пер мского университета» – Пермь: 2017. – №4 (43). – с.112-122.
36. Малинин, В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологич еской информации. – СПб. : РГГМУ, 2008. – 407 с.
37. Национальный план д ействий Республики Таджикистан по смягчению п оследствий изменения климата. – Душанбе : Таджикглавгидромет. – 2003. – 264 с.
38. Обзор состояния и тенденция изменения климата Якутии/ Балобаев В. Т., Гаврилова М. К., Скачков Ю. Б., Гаврильев П. П. и д р. – Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2003. – 52 с.
39. Обзор доклада Николаса Стерна «Экономика изменения клим ата». – 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.
40. Определение основных расчетных гидрологических характеристик: СП 33 - 101-2003. – М.: Госстрой России, 2004. – 73 с.
41. О регионе. Официальный сайт Торгово -промышленной палаты Республ ики Саха (Якутия). – [Электронныи ресурс]. – 2017. – Режим доступа – http://sakha.tpprf.ru/ru/region/
42. О Республике Саха (Якутия). Официальный сайт Правительства Респу блики Саха (Якутия). – [Электронныи ресурс]. – 2017. – Режим доступа – https://www.sakha.gov.ru/o -respublike-saha-yakutiya-/o-respublike
43. Официальный сайт ФГБУ «Главная геофизическая обсе рватория им. А.И. Воейкова». Раздел «Изменения климата в России в 21 веке (м одели CMIP 5)». – [Электронныи ресурс]. – 2017. Режим доступа http://voeikovmgo.ru/ru/izmenenie -klimata-v-rossii-v-xxi-veke?id=613
44. Официальный сайт пятой фазы проекта по сравнению взаимосвязанных м оделей Всемирной про граммы по изучению климата, раздел «Доступ к да н-

ным». – [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/data_portal.html
45. Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации не 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 гидромете орологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). – М. : Д'АРТ: Главная геофизическая обсерватория, 2011. – 252 с.
46. 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.
47. Парниковые газы – глобальный экологический ресурс: справ. пособие под ред. Кокорина, А.О. – М., 2004. – 136 с.
48. Первый двухгодичный доклад Российской Федерации, представленный в соответствии с Решением 1/CP.16 Конференции Сторон Рамочной Конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата. Министерство природных ресурсов и экологии РФ, Росгидромет. – М. : 2014. – 27 с.
49. 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.
50. Полярные регионы (Арктика и Антарктика). Изменение климата и его последствия. Перевод Глава 15 рабочей группы 2 Четвертого оценочного доклада МГЭИК (с.24–27).
51. 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.
52. 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».
53. Рекомендации по статистическим методам анализа однородности пространственно-временных колебаний речного стока. ГГИ. — Л. : Гидрометеоиздат, 1984. – 78 с.
54. Республика Саха (Якутия). Информационный меморандум. – Обзор. Подготовлен БК «Регион». – М., 2013. – 45 с.
55. Седьмое национальное сообщение Российской Федерации представленное в соответствии со статьями 4 и 12 РКИК ООН и статьей 7 Киотского протокола.
56. 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.

57. 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.
58. Скачков, Ю. Б. Тенденции современных изменений температуры во здуха в республике Саха (Якутия) Исследования ландшафтов криогенных обла стей// Вопросы географии Якутии. – Вып.9. Якутск : Изд-во ИМЗ СО РАН, 2005. – с.27–31;
59. Скачков, Ю. Б. Современная изменчивость климата Якутии// Девятое сиби рское совещание по климато-экологическому мониторингу: Материалы ро сийской. конф./ Под ред. М.В. Кабанова. – Томск : изд. Аграф-Пресс, 2011. – с.66–68.
60. Социально-экономическое развитие Республики Саха (Якутия). Информац ионный портал «ГОССМИ.РУ». – [Электронныи□ ресурс]. – 2017. – Режим доступа – http://gossmi.ru/page/gos1_834.htm
61. Схема комплексного развития производительных сил, транспорта и энерг етики Республики САХА (Якутия) до 2020 года. Сводный том. Утверждена Постановлением Правительства Республики Саха (Якутия) №411 от 06.09.2006 г.
62. Труды Главной геофизической обсерват ории им. А. И. Воейкова. Под ред. Катцова В. М., Мелешко В. П. Выпуск №563 – Спб., 2011. – 324 с.
63. Якутия. Серия «Природные условия и естественные ресурсы СССР». – М. : Изд-во «Наука», 1965. – 468 с.
64. Фёдоров, А. Н. «Спасская Падь»: Комплексные исс ледования мерзлотных ландшафтов. – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2006. – 210 с.
65. Шерстюков, А. Б. Изменения климата и их последствия в зоне многоле тней мерзлоты России. – Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2009. – 127 с.
66. Changing Climate, Changing Communities. Guide and Workbook for Munic ipal Climate Change Adaptation, ICLEI Project, Ca nada.
67. Chepurina, M. What's behind Russia's climate policy? Small steps to - wards an intrinsic interest, Working Papers N°03/12, IDDRI, Paris.
68. Climate change and natural d isasters: A challenge for Russian policymakers. 1.10.2014. Roger Roffey. Swedish Defence Research Agency (FOI).
69. Climate change indicators in the United States, 2014. Third edition. U.S. Env ironmental Protection Agency. EPA 430-R-14-004.
70. Dawson Climate Change Adaptation Plan. Community Adaptation Project, Da wson Adaptation Project, Yukon, Canada.
71. Fedorov, A. N., Konstantinov, P. Ya. Response of permafrost landscapes of Ce ntral Yakutia to current changes of climate, and a nthropogenic impacts. Geography and Natural Resources 30, 2009. – pp.146–150.
72. Kokorin, A. Economic and environmental factors behind Russia's climate po licy development (2014); International Research Jou rnal, Vol. 11-3 (30).
73. 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.

74. Lesnikowski, A., Ford, J., Biesbroek, R. What Does the Paris Agre ement Means for Adaptation?. Climate Policy. 2017 . – 17: Vol.7, pp.825–831.
75. Mogelgaard, K. What Next? Climate Adaptation After Paris. – [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа – https://www.wilsoncenter.org/event/what-next-climate-adaptation-after-paris
76. 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
77. Municipal Climate Change Action Plan Guidebook. Developing Cl imate Change Capacity at the Municipal Level in Nova Scotia, Canada.
78. Nachmany M., Fankhauser, S., Davidova, J., Nick Kingsmill, Tucker Lande sman, Hitomi Roppongi, Philip Schleifer, Joana Setzer, Amelia Sharman, C. Stolle Si n-gleton, Jayaraj Sundaresan and Terry Townshend. 2015. The 2015 G lobal Climate Legislation Study - A Review of Climate Change Legislation in 99 Countries. London: GLOBE International and the Grantham Research Institute, London School of Economics.
79. Ngwadla, X. and El-Bakri, S. 2016. The Global Goal for Adaptation und er the Paris Agreement: Putting ideas into action. London, UK: Climate and Develo p-ment Knowledge Network.
80. Sharmina, M., Anderson, K. and Bows-Larkin, A. (2013), Climate change re-gional review: Russia. WIREs Clim Change, 4: pp.373–396.
81. Wang B., S. Xu, and L. Wu, 2012: Intensified Arabian Sea tropical storms. N ature, 489, E1–E2.
82. Westerling, A. L., Bryant, B. P. 2008. Climate change and wildfire in Califo rnia, Climate change, 87 (1), pp.231–249.
83. The WCRP CMIP3 Multimodel dataset – A new era in Climate change research. 12pp http://nldr.library.ucar.edu/repository/assets/ams-pubs/ams_pubs_200083.pdf
84. White W. B., and Z. Y. Liu, 2008: Non-linear alignment of El Nino to the 11-yr solar cycle. Geophys. Res. Lett., 35, L19607.
85. Zhang H. et al. 2005. “Trends in Middle East Climate Indices from 1950 to 2003.” Journal of Geophysical Research 110 (D22104): 1-12.
86. Zhang X., et al., 2005: Trends in Middle East climate extreme indices from 1950 to 2003. J. Geophys. Res. Atmos., 110, doi: 10.1029/2005JD006181.
87. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/contents.html
88. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg2/en/contents.html
89. http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/data_portal.html – Официальный сайт пятой фазы проекта по сравнению взаимосвязанных моделей Всемирной программы по изучению климата, раздел «Доступ к данным».

Научное издание

Владимир Алексеевич Лобанов

Кириллина Кюннэй Святослав овна

СОВРЕМЕННЫЕ И БУДУЩИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

Монография

Печатается в авторской редакции.

Подписано в печать 12.01.19. Формат 60×90 1/16. Гарнитура Times New Roman.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,0. Тираж 150 экз. Заказ № 724.
РГГМУ, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская, 79.