

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИВП РАН)**

(на правах рукописи)

Направление подготовки: 05.06.01, Науки о Земле

Направленность (профиль) подготовки:

25.00.27, Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

Форма обучения: очная

Научно-квалификационная работа

**«Оценка климатически обусловленных изменений подземного стока в
Баренцево и Белые моря с северо-восточной части Балтийского щита»**

Аспирант: Ковалева А. А.

Научный руководитель: кандидат географических наук

старший научный сотрудник Дзюба А. В.

Москва, 2020

Оглавление

Введение.....	3
1. Глава 1. Степень научной разработанности проблемы	7
1.1. Работы, оценивающие современные изменения характеристик водных ресурсов.....	7
1.2. Работы, оценивающие возможные изменения в подземных водах связанные с влиянием климатических вариаций	16
1.3. Работы, посвящённые изучению территории Кольского полуострова.....	23
2. Глава 2. Статистический анализ современных климатических изменений в северо-восточной части Балтийского щита.....	26
2.1. Создание и анализ массива эмпирических данных	26
2.2. Методика статистического анализа.....	29
2.3. Диагноз многолетних изменений климатических переменных, определяющих естественные ресурсы подземных вод	32
3. Глава 3. Оценка влияний вариаций климата на подземный сток северо-восточной части Балтийского щита.....	40
3.1. Гидрогеологические условия и факторы формирования стока в северо-восточной части Балтийского щита	40
3.2. Анализ метеорологических факторов общего речного стока на территории Кольского полуострова	44
3.3. Анализ статистических характеристик	50
3.4. Тенденции в изменении многолетних рядов	65
3.5. Расчет подземного стока на отдельных водозаборах и практическая его оценка.....	65
3.6. Влияние вариаций климата на подземный сток северо-восточной части Балтийского щита	74
Заключение	77
Список литературы	79

Введение

На рубеже XX и XXI вв. зафиксировано повышение среднегодовой приповерхностной температуры воздуха Земли на 0.6°C , на территории России - 0.9°C . Глобальное повышение среднегодовой температуры воздуха приводит к изменению региональных величин испарения и осадков. Это обуславливает среднегодовое приращение или сокращение речного и подземного стоков. Следовательно, региональная и глобальная оценка изменений подземного стока как элемента водного баланса имеет определенную физическую основу. Прогнозные оценки изменения водных ресурсов на ближайшую и отдаленную перспективы недостаточно совершенны и содержат определенные ошибки, поэтому они должны быть вариантными и соответствовать наиболее вероятной направленности климатических изменений в будущем.

К настоящему времени среди научного сообщества не выработано консолидированного суждения о влиянии современных климатических вариаций на подземные воды;

Актуальность работы обусловлена необходимостью оценки и прогноза изменения водных ресурсов в условиях меняющегося климата;

Получение статистически достоверной оценки влияния вариаций климата последних и ближайших десятилетий на гидрологический режим Кольского полуострова - необходимое условие рационального природопользования и устойчивого развития северо-западной части России.

Целью работы является: оценка чувствительности подземного стока в северо-восточной части Балтийского щита к современным вариациям климата

Для достижения этой цели решались следующие основные задачи:

- анализ гидрогеологических условий и факторов формирования стока северо-восточной части Балтийского щита;
- создание массива эмпирических данных по расходам воды, температуре приземного воздуха и количеству атмосферных осадков, отвечающего требованиям длительности, однородности, достоверности и репрезентативности, необходимых для исследований влияния изменений климата на подземные воды восточной части Балтийского щита
- статистический анализ многолетних изменений климатических переменных, определяющих подземный сток;
- количественное выделение подземного стока;
- анализ динамики речного и подземного стока;
- оценка чувствительности подземных вод Кольского полуострова к современным вариациям климата.

Объект исследования – поверхностные и подземные воды Кольского полуострова.

Предмет исследования – многолетние изменения гидрометеорологических характеристик, определяющих естественные ресурсы подземных вод Кольского полуострова.

Работа имеет междисциплинарный характер и выполнена на стыке климатологии, гидрологии, гидрогеологии и океанологии

Научная новизна работы. Впервые для изучаемой территории описана межгодовая изменчивость подземного стока и климатических характеристик его определяющих.

Теоретическая значимость работы. Описание физических и статистических закономерностей связи подземного стока и определяющих его естественных факторов является важным аспектом для научного понимания современного этапа эволюции климата.

Практическая значимость работы. Оценка подземного стока слабо изученных территорий в условиях наблюдаемых девиаций климата направлена на решение актуальной практической задачи о степени уязвимости водных ресурсов к современным изменениям окружающей среды. Результаты работы могут быть применены при региональных географических и геологических исследованиях, а также могут быть использованы в учебном процессе для естественно-научных направлений

Защищаемые положения.

о Сформирован уникальный массив эмпирических данных по расходам воды, температуре приземного воздуха и количеству атмосферных осадков, отвечающий требованиям ВМО по длительности, однородности, достоверности и репрезентативности, необходимых для исследований влияния изменений климата на подземные воды восточной части Балтийского щита;

о Многолетние межгодовые изменения температуры приземного воздуха статистически значимы, а значения углового коэффициента тренда превышают стандартную ошибку его определения. Однако, значения коэффициентов детерминации трендов (или оценки достоверностей трендов) не превышают 50%, а в ряде случаев значительно меньше;

о Для описания многолетних межгодовых изменений количества атмосферных осадков оптимальной является модель случайного процесса с присущей ему изменчивостью;

- Использование при анализе многолетних вариаций климата выборочных статистических оценок, а не их ансамбля, порождает опасность формирования статистически недостоверных суждений об их характере;

- Рассчитаны и проанализированы многолетние межгодовые изменения подземного стока в северо-восточной части Балтийского щита;

- Начало зимней межени смещается на более поздние сроки и смещается начало кривой спада расходов воды. Снеготаяние начинается раньше, вследствие чего продолжительность межени уменьшается. Увеличение подземного стока в зимний период влечет за собой повышение уровней подземных вод, а общее повышение температуры воздуха приводит, как следствие, к увеличению температуры почв и подземных вод. Однако коэффициенты детерминации указанных направленных изменений составляют всего лишь 1-4%;

- Значения коэффициентов вариации для изучаемых створов указывают на значительные колебания подземного стока от года к году;

- Ансамбль статистических оценок не свидетельствуют о статистически значимом влиянии климатических девиаций последних десятилетий на подземный сток в северо-восточной части Балтийского щита.

Объем и структура работы. Научно-квалификационная работа состоит из 3 глав, введения и заключения. Объем работы составляет 92 страницы, включая 17 рисунков и 14 таблиц. Библиографический список содержит 160 наименований.

Публикации. По теме научно-квалификационной работы опубликовано 2 печатные работы, из них 1 в научных изданиях, рекомендованных ВАК.

- Дзюба А. В., Ковалева А. А. Опасность недостоверной оценки влияния современных климатических вариаций на питание подземных вод. // Сергеевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи. – вып. 18. – М.: РУДН, 2016. – С. 487-492.
- Дзюба А. В. Ковалева А. А. Предпосылки формирования риска контаминации подземных вод в зоне распространения многолетней мерзлоты // Геориск 2015. С. 448-454

Также подготовлена статья для журнала Водные ресурсы (рекомендованный ВАК), на данный момент она находится на этапе публикации

- Ковалева А. А. Дзюба А. В. Многолетние изменения климатических характеристик, определяющих питание подземных вод северо-восточной части Балтийского щита

Апробация работы. По указанным публикациям и основным результатам научно-квалификационной работы сделаны доклады на Российских и международных научных конференциях.

- Научная конференция «Восемнадцатые Сергеевские чтения» на тему «Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи», г. Москва
- Девятая международная научно-практическая конференция «Анализ, прогноз и управление природными рисками в современном мире», г. Москва, *устный доклад*

Благодарности. Автор выражает благодарность: своему научному руководителю Дзюбе Александру Викторовичу за предоставленную возможность работать по данной тематике и помощь в написании квалификационной работы.

1. Глава 1. Степень научной разработанности проблемы

При работе над квалификационной работой были изучены исследования российских и зарубежных ученых, посвященные кругу вопросов, связанных с влиянием изменений климата на подземные воды. Основное внимание уделено опубликованным в нашей стране и за рубежом научным статьям в рецензируемых журналах, содержащие методические аспекты и конкретные результаты исследований.

В последние годы во многих странах выполнено огромное число исследований, по количественной оценке, гидрологических последствий глобального потепления в различных регионах мира. Эти исследования базируются на разных сценариях и охватывают большой диапазон изучаемых объектов - от малых водосборов до крупных речных систем, регионов, природных зон, континентов и Земли в целом.

Изменение климата и антропогенная деятельность играют важную роль в наблюдаемых изменениях водных ресурсов по всему миру. Тем не менее, величина этих факторов, влияющих на водные ресурсы зависит от региона, его степени изученности и масштаба исследований.

Многочисленным публикациям исследователей присущ большой диапазон мнений при освещении отдельных аспектов данной тематики.

Рассмотренные исследования поделены на три основные группы:

1. Работы, оценивающие современные изменения характеристик водных ресурсов;
2. Работы, оценивающие возможные изменения в подземных водах связанные с влиянием климатических вариаций;
3. Работы, посвящённые изучению территории Кольского полуострова.

1.1. *Работы, оценивающие современные изменения характеристик водных ресурсов*

Ресурсы подземных вод, как и водные ресурсы в целом, являются климатически обусловленными природными ресурсами. Изменения климата неизбежны. Это – факт, подтверждающийся всей историей Земли. Наиболее важными климатическими факторами, с точки зрения оценки водных ресурсов, являются осадки, температура и испарение, которое определяется по данным о чистоте радиации на уровне земли, влажности воздуха, скорости ветра и температуре.

В XXI веке, в целом, наблюдается увеличение количества осадков, суммарного испарения и влажности почвы в глобальном среднем значении, но с существенными региональными особенностями. Различия и неопределенности отражаются в

региональных изменениях и неопределенностях в суммарном испарении и стоке. Причины климатических изменений различны, некоторые из них могут быть непосредственно связаны: с антропогенным изменением, изменениями в землепользовании, процессами ирригации, урбанизации, а также с физиологическими реакциями растений на уровень CO₂. Проектные климатические модели показывают увеличение количества осадков в среднем по миру, но с существенными региональными колебаниями [109, 118].

Осадки и потенциальное испарение являются основными климатическими факторами, влияющими на водные ресурсы пресной воды. Осадки тесно связаны с содержанием водяного пара в атмосфере, поскольку удельная влажность насыщения зависит от температуры: более теплый воздух может содержать гораздо больше водяного пара. Согласно пятому докладу IPCC (МГЭИК) в последние десятилетия температура повысилась, а относительная влажность поверхности и тропосферы изменилась незначительно [109].

К другим климатическим факторам относятся атмосферный углекислый газ, который влияет на транспирацию растений, а также отложения черного углерода и пыли, которые, даже в очень малых концентрациях, способствуют таянию снега и льда за счет уменьшения поверхностного альбедо [109, 118].

Наблюдения, за климатическими факторами, со средним и высоким уровнем достоверности, согласно пятому докладу IPCC [109] изложены ниже.

Температура поверхности, которая влияет на проницаемость атмосферы и соотношение количества снега и осадков, увеличивается неравномерно примерно в 1,5 раза. Причем увеличение происходит больше над сушей, чем над океаном [109, 118].

Наблюдаемое потепление максимально наблюдается в арктических широтах, это подтверждается изменениями в снежном покрове и сокращению площадей ледников [109, 118].

Меньшее количество «жидких» осадков выпадает по мере уменьшения объема и продолжительности снежного покрова. Однако в холодных регионах увеличение продолжительности и интенсивности зимних снегопадов превышает величину таяния снежного покрова в теплый период [109, 118].

Для регионов с повышенной влажностью дождливые сезоны становятся более продолжительными, а в засушливых регионах увеличиваются сезоны засухи [109].

В целом среднее количество атмосферных осадков увеличивается, но в некоторых регионах уменьшается. Осадки имеют тенденцию к снижению в субтропических широтах, особенно в Средиземноморье, Мексике и Центральной Америке, и в некоторых частях Австралии, а увеличение происходит в высоких

северных широтах, Индии и в некоторых районах Средней Азии. Однако изменения осадков обычно становятся статистически значимыми только тогда, когда температура повышается как минимум на 1,4 °C, и во многих регионах прогнозируемые изменения XXI-го века находятся в пределах естественной изменчивости конца XX века [124].

По оценкам IPCC ожидаются более интенсивные экстремальные явления осадков [149]. Одной из предположительных причин такого явления является прогнозируемое увеличение удельной влажности: интенсивные осадки за короткий период времени (менее 1 часа) [109, 112, 133].

Изменения в испарении имеют закономерности, сходные с изменениями в осадках, особенно это проявляется в более высоких северных широтах. Зависимое от климатического сценария, уменьшение влажности наблюдается в центральной и южной Европе, юго-западной части Северной Америки, Амазонии и южной части Африки [109].

В работах В. Ф. Логинова и др. рассматриваются естественные факторы глобального и регионального изменения климата, проводятся оценки экономических, социальных и экологических последствий экстремальных климатических явлений и возможных изменений климата [33, 52-54].

Преимущественно в XX веке были разработаны и успешно применялись методы оценки гидрологических характеристик, основанные на гипотезе стационарности гидрологических и климатических условий формирования речного стока во времени. Однако, правомерность концепции стационарности многолетних колебаний речного стока ставится под сомнение многими исследователями [1, 9, 33, 52, 72], в связи с усилившимися в последней четверти XX века процессами глобального потепления климата [70].

Исследования Jiménez Cisneros и др. выявили, что полученные тренды в наблюдениях годового стока обычно следовали за наблюдаемыми изменениями региональных осадков и температуры в последние десятилетия. Более поздние исследования, проведенные в SR1.5, также пришли к выводу, что наличие 1 статистически значимой тенденции, обусловленной климатом, в наблюдаемой серии ежегодных стоков остается неопределенным [105, 109].

Нет четких тенденций изменения локального стока и стока в глобальном масштабе, основанного как на наблюдательных, так и на восстановленных наборах данных в течение последних десятилетий [94].

Пространственные различия в среднегодовых тенденциях значений поверхностного и подземного стока по всему миру зависят от климатических факторов (в частности, от осадков и потенциального испарения до антропогенного воздействия).

По имеющимся исследованиям наблюдается, что сток преимущественно более чувствителен к изменениям осадков, чем к возможному испарению. Около 83% мирового стока показали высокую чувствительность к тенденциям осадков, в то время как оставшиеся 17% контролируются другими факторами [87, 103].

В засушливых и полузасушливых областях чувствительность стока к изменениям осадков высока, но чувствительность к другим факторам (например, изменение изменчивости климата и землепользование /характер земного покрова) еще выше [87].

Для речных бассейнов, затронутых антропогенной деятельностью (водозабор, изменение землепользования / покрытия, эксплуатация плотин и водохранилищ и т.д.), роль климатических факторов в наблюдаемых изменениях стока следует интерпретировать с осторожностью. По результатам исследований более чем 90% изменения стока связано с антропогенным воздействием в каждом отдельном суббассейне реки Хуанхэ между 1960 и 2012 годами [113]. Для большинства рек в Индиане, Нью-Йорке, Аризоне и Джорджии в США антропогенные факторы изменения стока оказались более значительными, чем климатические [78].

В тоже время, существует высокая степень уверенности и достоверности среди научного сообщества в том, что в изменениях среднего и максимального стока рек, преимущество остается за климатическими факторами, особенно в холодных районах [57].

Прогнозы будущего изменения климата следующие: наиболее вероятное глобальное повышение средней температуры воздуха к 2020-му году составит около 1°C относительно доиндустриального периода. Такие выводы получены на основе докладов МГЭИК и СДСВ (специальный доклад о сценариях выбросов). Географические закономерности прогнозируемого потепления показывают наибольший рост температуры в высоких северных широтах. Прогнозируется, что повышение температуры летом будет более сильным, чем зимой, за исключением арктических широт. Ожидается, что температура XXI века в будет повышаться в течение всех сезонов года, хотя и с разными приращениями, осадки могут увеличиваться в один сезон [131].

Несмотря на то, что вопрос о причинах современного глобального потепления не является до конца решенным, в исследованиях многих ведущих климатологов мира делается вывод об антропогенном характере потепления. Это связано с ростом концентрации CO₂, CH₄ и др. парниковых газов в атмосфере [52, 72, 47-50, 85].

В регионах с холодным климатом глобальное потепление уже повлияло на накопление снежного покрова и процессы таяния, которые обычно контролируют

количество и время годового пикового стока. В таких условиях в большинстве исследований сообщалось об: увеличении стока зимой в основном из-за увеличения количества «жидких» осадков; уменьшение стока талого снега в связи с меньшим скоплением снега; отмечены наиболее ранние пики снеготаяния и более низкие уровни воды в межень [87, 105, 109].

В работах Дзюбы А. В. И Зекцера И. С. рассмотрены неопределенности современных оценок влияния многолетних вариаций климатических характеристик на подземный сток и ресурсы подземных вод [27, 146]. Впервые описан механизм естественного флористического демпфирования возможных изменений питания подземных вод и в целом температурно-влажностного режима крупных регионов, вызванных климатическими изменениями вследствие роста концентрации парниковых газов в тропосфере [27]. Этими же авторами был проведен анализ условий формирования и динамики подземных вод верхней гидродинамической зоны северного побережья Европейской части России, разгружающихся непосредственно в Баренцево и Белое моря [42, 145]. Количественно оценены значения субмаринного подземного стока в Северный Ледовитый океан. Проведен анализ устойчивости морских арктических метаногидратов в условиях наблюдаемых и ожидаемых изменений климата. Физически обоснована не противоречащая эмпирическим данным концепция климатически обусловленного увеличения субмариной разгрузки подземных вод как возможной причины роста интенсивности разрушения арктических гидратов метана [26, 28, 29]. Авторами описаны механизмы формирования и оценка прямых и обратных связей между динамикой климата Арктики и криолитозоны [31, 30].

Георгиевским В. Ю. и Ежовым А. В. в 1996 году дается оценка влияния возможных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек территории СССР [17], позже такие исследования сделаны Георгиевским В. Ю. и др. для территории России [16]. По бассейну Волги проведены исследования влияния климата на составляющие водного баланса бассейна [18, 19, 45].

Тенденции общего глобального и локального стока могут существенно отличаться из-за различий в данных наблюдений, периоде исследования, применяемой методологии [144]. Хотя существуют различные наблюдательные и смоделированные наборы данных (например, Глобальный центр данных по стоку, GRDC), все еще очень проблематично получить и актуализировать данные для многих районов [144].

Модели общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) являются мощными инструментами учета для комплексной оценки процессов, влияющих на вероятные изменения климата в будущем. Однако прогнозы МОЦАО в настоящее время подвержены значительной неопределенности в процессе моделирования, поэтому

достаточно сложно вычлениить влияния изменений климатических характеристик на водные ресурсы [110, 127].

В рамках проекта IPCC, посвященному сравнению связанных моделей были проанализированы результаты восемнадцати МОЦАО. У большинства МОЦАО возникли трудности с моделированием осадков. Результаты моделирования показали достаточно плохую сходимость с наблюдаемыми значениями [90, 118, 136].

Для одного и того же сценария выбросов разные МОЦАО приводят к различным прогнозам, это связано с уникальными географическими особенностями. Meehl с коллегами утверждает, что сходимость результатов для прогнозов изменений температуры намного выше, чем для изменений осадков. Для изменений осадков к концу XXI века среднее значение мультимодельного ансамбля превышает стандартное отклонение между моделями, созданных только для «высоких» широт. В нескольких регионах модели не совпадают по признакам и причинам изменений количества атмосферных осадков. Чтобы выявить неопределенности, используется множество прогонов с применением различных МОЦАО с многочисленными параметрами модели. При анализе результатов опираются на прогоны модели с несколькими ансамблями параметров или тысячи прогонов с постоянными значениями параметров для одной МОЦАО. Такие подходы позволяют построение условных сценариев вероятности возможных изменений в будущем [118, 128, 130].

Однако такие большие ансамбли переменных довольно трудно использовать на практике при проведении исследования воздействия на водные ресурсы. Поэтому зачастую вместо этого используются модельные сценарии для различных ансамблевых значений. Минусом является - неспособность таких сценариев точно воспроизвести диапазон моделируемых региональных изменений [130].

Существуют альтернативные варианты - рассмотреть ряд результатов из различных существующих МОЦАО в глобальном и локальном масштабе, ограниченным площадью водосбора [131].

В статье Oki T., Kanae S. проводится детальный анализ использования результатов различных климатических моделей по изменению количества атмосферных осадков при реализации различных климатических сценариев. Рассматриваются вопросы учета интенсивности осадков, а также экстремальных осадков при расчете питания подземных вод [134].

Шикломановым И. А. и Георгиевским В. Ю. были выполнены расчеты по оценке возможных изменений водных ресурсов крупных рек бассейна Северного Ледовитого океана [70]. В работах этих авторов приводятся результаты по 6 МОЦАО выпуска IPCC-2001. Заостряется внимание на наиболее проблемном, с точки зрения

водообеспеченности регионе - юго-западная часть Европейской Территории России (ЕТР).

Оценка Arnell, N. W. с помощью МОЦАО: HadCM2 и HadCM3 (две реализации модели HadCM), на основе SRES, проводились для всего земного шара [85]. Возможные изменения рассматривались на перспективу середины XXI века, условно называемую 2050 г. (дата - формальная; берется среднее значение периода 2040 - 2069 гг.). Это исследование демонстрирует модельную неопределённость и интересно с методической точки зрения [83, 85].

Исследования по оценке возможного диапазона изменений характеристик водного режима при вероятных климатических сценариях ближайших десятилетий проводились в Государственном Гидрологическом Институте (ГГИ) со времени появления первых МОЦАО и палеоклиматических сценариев. Были применены модели из комплекта CMIP3 и получены оценки изменений годового и сезонного стока (за теплый/холодный период) в первой половине XXI века. Расчеты производились на водосборах 7 крупнейших рек России (Волги, Печоры, Северной Двины, Днепра, Лены) [24, 36].

Работы по оценке изменений речного стока в XXI веке, на основе реализаций подобных моделей, проводились в Главной Геофизической Обсерватории (ГГО) им. А. И. Воейкова для крупных регионов России. В качестве прогнозных характеристик годового стока авторами принималась разница осадков и испарения, рассчитанная по ансамблю из 26 моделей CMIP5 [46, 71].

Работы С. Г. Добровольского посвящены проблеме климатических изменений, в частности глобальному потеплению, и речному стоку. В них содержится ряд методологических предложений по оценке достоверности результатов, получаемых на основании проекций климата по реализациям МОЦАО вод [34, 35].

Вероятные будущие изменения годового общего стока будут следовать прогнозируемым моделям выпадения осадков по всему миру. Наибольшее увеличение значений прогнозируется в северных высоких широтах, тогда как наибольшее снижение в низком потоке прогнозируется в Южной Америке, Европе и на Ближнем Востоке [109, 118].

Современные оценки ежегодных изменений поверхностного и подземного стока, вызванных прогнозируемыми изменениями климата в XXI веке, выводятся либо непосредственно в виде выхода стока из глобальных климатических моделей, участвующих в CMIP5 (GCMs-CMIP5) [94], или из глобальных гидрологических моделей (GHM) и моделей земной поверхности (LSM) [101] или из бассейновых (региональных) гидрологических моделей (RHM) [13, 117, 118].

Прогнозы GCMs-CMIP5 показывают широкий диапазон возможных результатов, включая как увеличение, так и уменьшение стока в большинстве крупных бассейнов, во многих случаях с консенсусом большинства по одному или другому, но в других случаях с примерно равным разделением. В соответствии с выводами как AR5, так и SR1.5, прогнозы GCMs-CMIP5 в целом согласуются с прогнозом увеличения количества осадков в высоких широтах северного полушария и уменьшения количества осадков в субтропиках и некоторых регионах средней широты; следовательно, прогнозируемый сток отражает тенденцию выпадения осадков [95, 96, 117, 118]. Эти изменения стока являются результатом соответствующих изменений осадков на 10–25% в этих регионах. Прогнозы являются более надежными и достоверными для северных широт Северной Америки и Евразии, в Европе и на юго-западе Соединенных Штатов [109].

Оценка прогнозируемых изменений годового стока в глобальном масштабе была в основном основана на моделировании CMIP3 и показала среднее увеличение среднегодового стока в высоких широтах и влажных тропиках вместе с уменьшением в засушливых тропических регионах. Однако существует неопределенность в масштабах и признаках изменений стока в других частях света, особенно в Южной Азии, где будущие изменения в осадках муссонов крайне неопределенны. Аналогично, сезонное распределение изменений стока зависит от сезонного распределения осадков, которое колеблется в зависимости от выбранного сценария. Такие будущие сезонные изменения в целом хорошо согласуются в тех районах, которые в настоящее время находятся под влиянием снегопада и таяния снега, в которых максимальный годовой сток рек, в связи с наблюдаемыми климатическими изменениями, будет уменьшаться и смещаться на более ранние сроки. Это было проанализировано, детализировано и подтверждено в SR1.5 на основании прогнозов стока на основе CMIP5 для уровней глобального потепления 1,5 °C и 2 °C [105, 109].

Исследования RHM были вызваны подмножеством климатических прогнозов, а именно 5 GCM, которые были выбраны в рамках проекта сравнения межсекторальных моделей воздействия (например, ISI-MIP). Напротив, анализ прогнозов стока, в масштабе водосборной площади, полученных непосредственно из полного набора GCM в CMIP5, показывает большие неопределенности в прогнозируемых изменениях с различиями в знаке прогнозируемого изменения [101].

Моделированием речного стока на основе информационно-моделирующего комплекса ECOMAG занимается Ю. Г. Мотовилов. В своих работах он рассматривает системы физико-математических моделей формирования речного стока и их применение в задачах гидрогеологических расчетов и прогнозов. На примере речных

бассейнов, расположенных в разных физико-географических регионах, рассмотрены приложения моделей к актуальным задачам гидрологии речных бассейнов, включая оценку изменений водного режима под влиянием изменений климата и антропогенной нагрузки, управления действующими водноресурсными системами, эффективности противопаводковых мероприятий и др., а также к задачам оперативных гидрологических прогнозов. [60, 61].

Работы А. Н. Гельфана и др. посвящены разработке динамико-стохастических моделей формирования стока. Рассчитаны оценки возможных изменений речного стока до конца XXI в. по данным глобальных моделей климата. Представленные оценки и модели формирования стока могут служить основой для совершенствования традиционных методов расчетов [13-15].

Внутренняя изменчивость и вариация между климатическими моделями Hawkins и Sutton объясняют всю неопределенность в осадках в первые несколько десятилетий XXI века в проекциях CMIP3 проекта взаимного сравнения моделей. Вклад внутренней изменчивости постепенно уменьшается. Большая часть неопределенностей в осадках обусловлена расхождениями между моделями, а не сценариями. Однако, для температуры воздуха большая часть неопределенностей связана непосредственно с различными сценариями [104, 109].

Из-за недостаточности данных для выявления тенденций применяются различные климатические, гидрологические и гидрогеологические модели, которые различаются между собой различными входными параметрами. Однако влияние человеческой деятельности (например, урбанизация) на сток не учитывается большинством существующих моделей.

Zaherpour с коллегами оценил эффективность шести гидрологических моделей глобального масштаба при моделировании общего стока на территории 40 различных водосборов, принимая во внимание антропогенное воздействие. Исследователи пришли к выводу, что большинство моделей используют среднегодовые показатели или критические значения (максимумы, минимумы). Поэтому, чтобы улучшить понимание в целом, о процессе изменения стока и факторах, влияющих на него необходимо: продолжить и улучшить измерения потоков, особенно в районах со слабой степенью изученности; обмениваться в научном сообществе имеющимися данными и смоделированными временными сериями; и разрабатывать модели с наименьшей неопределенностью и большей эффективностью [144].

Выводы по разделу 1.1. Неопределенности в оценке воздействий изменения климата на водные ресурсы в основном связаны с неопределенностью входных данных, таких как осадки, выбросы парниковых газов, антропогенные факторы.

Неоднозначность в прогнозах изменения климата увеличивается с продолжительностью временных наблюдений. В настоящее время (2020 год) неопределенности в климатических моделях играют достаточно важную роль; в то время как в течение более длительного периода временных рядов неопределенности, связанные с выбором сценария выбросов, становятся все более значительными.

При использовании МОЦАО результаты моделирования показывают достаточно плохую сходимость с наблюдаемыми значениями. Такие неопределенности приводят к отклонениям при моделировании подземных и поверхностных вод при использовании прямых выходных данных МОЦАО. Для одного и того же климатического сценария или сценария выбросов разные МОЦАО приводят к различным прогнозам, это связано с уникальными географическими особенностями.

Чтобы выявить неопределенности, используется множество прогонов с применением различных МОЦАО с многочисленными параметрами модели. При анализе результатов опираются на прогоны модели с несколькими ансамблями параметров или тысячи прогонов с постоянными значениями параметров для одной МОЦАО. Такие подходы позволяют построение условных сценариев вероятности возможных изменений в будущем. Однако, зачастую применять эти методы на практике, при проведении исследования воздействия на водные ресурсы, трудно, так как необходимы обширные, достоверные и достаточно продолжительные ряды данных.

1.2. Работы, оценивающие возможные изменения в подземных водах связанные с влиянием климатических вариаций

Значительный интерес к проблеме влияния климата на подземные воды, возросший в последние годы, вызван, прежде всего, запросами практики – необходимостью оценить современное состояние и перспективы использования подземных вод для повышения устойчивости водообеспеченности экономики. В XXI веке количественная оценка изменений речного стока приобретает особую актуальность на фоне существующих вариаций климата и возрастающего дефицита водных ресурсов, ухудшения экологического состояния водных систем в районах интенсивного водопотребления и повышенной антропогенной нагрузки.

С 1970-х годов уровень подземных вод снизился во многих водоносных горизонтах по всему миру, особенно в засушливых районах, что объясняется главным образом антропогенным воздействием, но также и влиянием климатических изменений.

Современные проблемы изучения и использования питьевых подземных вод представлены в работе Боровского Б. В., Язвина Л. С., Зекцера И. С. Этим авторами представлена оценка современного состояния водных ресурсов, использования

подземных вод и обеспеченности хозяйственно-бытовых потребностей, а также исследований по оценке ресурсного потенциала подземных вод России по субъектам и гидрогеологическим структурам [9].

Подземные воды чрезмерно интенсивно эксплуатируются и извлекаются в некоторых районах мира, это приводит к серьезному истощению водных ресурсов. Чрезмерная добыча подземных вод в крупных водосборных бассейнах мира негативно влияет на сток в глобальном масштабе. Прогнозируется, что к 2050 году в 42-79% мировых водосборных бассейнов, где происходит интенсивная эксплуатация подземных вод, будут достигнуты экологически критические значения, что, в свою очередь, повлияет на экосистемы, зависящие от рек и подземных вод [93, 102].

На данный момент достоверно неизвестно в какой степени изменения климата воздействуют на подземные воды, такая неопределенность возникла в основном из-за отсутствия необходимых рядов наблюдений [27, 109, 146].

Глобальный анализ спутниковых измерений GRACE (2002–2016 гг.) Для 37 крупных систем водоносных горизонтов мира показывает, что тенденции в питании подземных вод преимущественно нелинейные. Однако в регионах с холодным климатом, где таяние снега преобладает в гидрологическом процессе, питание подземных вод сократилось и сместилось на более раннюю часть года [139].

Малые водосборные территории более чувствительны к изменению климата, чем более крупные. Ограниченные и более глубокие водоносные горизонты с большей вероятностью будут менее чувствительны к прямым последствиям изменчивости и изменения климата [143]. Точно так же Cuthbert и др. пришли к выводу, зависимость от подземных вод экосистемы в аридных регионах более устойчивы к изменению климата по сравнению с влажными регионами [93].

Интерес к изучению климатических вариаций и их взаимосвязи с подземными водами нашел свое отражение в исследованиях зарубежных и российских авторов.

Наиболее крупной работой раннего периода, посвященной изучению влияния климата на подземные воды, среди отечественных авторов, является работа «Режим подземных вод» Г. Н. Каменского, Н. Н. Биндемана, М. А. Вевировской, М. Е. Альтовского. В этой публикации впервые описан механизм воздействия различных метеорологических факторов на режим подземных вод. В 1930-х годах в разных странах начались систематические наблюдения за режимом подземных вод, что позволяет сейчас проводить их пространственно-временной анализ [11].

Корреляционные связи многолетних изменений уровня подземных вод с индексами атмосферной циркуляции по Г. Я. Вангенгейму, Б. Л. Дзердзиевскому и И. В. Максимовой впервые рассмотрены в работах В. А. Коробейникова и В. С.

Ковалевского. Отдельные работы, посвященные вопросам влияния изменений климата на подземные воды опубликованы в 1970-х и 1980-х гг [47-50].

В последние годы проведен ряд исследований о влиянии климатических изменений на ресурсы и режим подземных вод территории Европы, Америки, Африки, Азии, Австралии. В этих работах с использованием различных моделей общей циркуляции атмосферы и океана получены оценки возможных изменений режима подземных вод на региональном уровне [80-83, 88, 99– 114, 126, 138].

Ансамблевые исследования, основанные на климатических моделях, воздействия изменения климата на возобновление запасов подземных вод, а также частично и на уровень подземных вод были проведены для: всего земного шара [135], всей Австралии [91], бассейна немецкого Дуная [84], водоносных горизонтов в Бельгии и Англии [109], тихоокеанского побережья США и Канады [79]. Моделирование проводилось только по одному сценарию выбросов. Диапазон прогнозируемых изменений подземных вод для климатических моделей был достаточно широким: от значительных сокращений до значительных увеличений в отдельных районах территории исследования. Диапазон процентных изменений прогнозируемого пополнения подземных вод, в основном, превышал диапазон прогнозируемых изменений атмосферных осадков [109].

В работе Dragoni W., Sukhija B. S. анализируются методы исследований для выявления зависимости между климатическими изменениями и подземными водами, а также области, где следует сфокусировать гидрогеологические исследования для того, чтобы смягчить последствия возможных изменений климата [97].

В работе Barthel R. представлен интегрированный подход к оценке подземных вод в условиях глобального изменения климата. Этот подход встроен в систему, разработанную в рамках междисциплинарного проекта Glowa-Дунай для моделирования взаимодействия природных и социально-экономических процессов в верхней части водосбора Дуная на период с 2011 по 2060 гг [83].

В статье Джамалова Р. Г., Сафроновой Т. И. отмечается, что глобальное повышение среднегодовой температуры воздуха привело к изменению региональных величин испарения и осадков и обусловило среднегодовое приращение (сокращение) речного и подземного стока поэтому региональная и глобальная переоценка ресурсов подземных вод в начале XXI века имеет конкретную практическую необходимость [25].

Неопределенности в прогнозируемом пополнении запасов подземных вод, возникающие по результатам гидрологического моделирования, слабо изучены. Существует всего несколько исследований, посвященных оценке взаимосвязи между

подземными водами, климатом и растительностью, изменения в которой связаны с выбросами CO₂ [28, 109, 146].

При любом конкретном климатическом сценарии области, в которых общий подземных и поверхностный сток по прогнозам увеличатся (или уменьшатся), примерно совпадают с областями, где прогнозируется ожидаемое увеличение (или уменьшение) питания подземных вод и, таким образом, возобновляемых ресурсов подземных вод [117].

Обнаружено, что изменения питания подземных вод связано с изменением осадков, с высокой чувствительностью для малых величин питания и низкой - для больших, причем отношение изменения питания к изменению осадков варьируется от 1,5 до 6,0 [92].

Изменения интенсивности осадков влияют на долю общего стока, который пополняет подземные воды. Повышенная интенсивность осадков может уменьшить питание подземных вод из-за превышения пропускной способности инфильтрации (как правило, во влажных областях), или может увеличить ее из-за более быстрого просачивания через корневую зону растений и, таким образом, уменьшить величину суммарного испарения. Однако, на территориях с преобладанием снега уменьшение количества снегопадов, в связи с потеплением атмосферного воздуха, может привести к уменьшению питания грунтовых вод, даже если количество осадков осталось неизменным [119]. На участках на юго-западе США таяние снега обеспечивает не менее 40–70 % питания запасов подземных вод, хотя только 25–50% среднегодового количества осадков выпадает в виде снега [98].

Чувствительность к климатическим вариациям для уровня подземных вод снижается, как правило из-за многолетней растительности, мелкозернистых почв и аквакультур и повышается за счет ежегодных посевов, песчаных почв и наличия «неограниченных» водоносных горизонтов [92].

Изменения в подземных водах традиционно наблюдаются на основе изменений в уровнях подземных вод, а в некоторых случаях на основе весеннего расхода или основного стока. В последние годы GRACE предоставил уникальный способ оценки изменений подземных вод в крупных водоносных горизонтах, но длина временного ряда все еще слишком мала для выявления и оценки изменений, связанных с вариациями климата. Прогнозировать пространственно-временные изменения количества, интервала и механизма питания сложно для большинства климатических регионов [139].

Изменение климата повлияет на подземные воды, находящиеся в прибрежных зонах, в результате проникновения соленой воды, вызванного повышением уровня

моря. Прогнозируется, что изменение климата увеличит соленость в прибрежных подземных водах в низколежащих дельтовых средах из-за увеличенного затопления морской воды, связанного с штормовыми нагонами от частых циклонов [107].

Оценка взаимосвязи между климатическими изменениями и подземными водами, находящиеся в прибрежной зоне осложняется колебаниями уровня моря и интрузией морских вод в береговых зонах [142]. Особенно это сказывается на участках с неглубоким залеганием подземных вод и дельтах рек. Если разница между уровнем грунтовых вод и уровнем моря уменьшается на 1 м, толщина неограниченного слоя пресной воды по соотношению Гибена-Герцберга уменьшается примерно на 40 м. Дельты подвержены воздействию штормовых нагонов, которые направляют соленую воду в водотоки, загрязняя нижележащие пресные водоносные горизонты [125]. В модельных исследованиях было установлено, что влияние повышения уровня моря на уровень грунтовых вод ограничено территориями в пределах 10 км от побережья [89].

В регионах с распространением многолетних мерзлых пород, сезонным снегом и льдом прогнозируется, что более теплый климат увеличит суммарное испарение, что приведет к уменьшению стока и, возможно, также к изменениям в питании подземных вод.

Изучение влияния климатических изменений на подземные воды территории распространения многолетнемерзлых пород в России проводилось в исследованиях Н. Г. Обермана, Е. Н. Бусыгиной, Н. Б. Какунова, А. М. Лыгина, И. Г. Шеслера, А. В. Дзюбы, И. С. Зекцера. [27, 40, 43, 62, 63, 132].

Из-за отсутствия данных долгосрочных наблюдений такие будущие прогнозы имеют очень низкую достоверность того, как изменение климата повлияет на уровень подземных вод и экосистемы, зависящие от них.

Основанная на модели, оценка наблюдаемого снижения уровня подземных вод в четырех эксплуатируемых водоносных горизонтах закарстованных областей на территории Испании привела к выводу, что питание подземных вод уменьшилось в течение XX века из-за уменьшения количества осадков и увеличения суммарного испарения [77].

Работы В. С. Ковалевского, В. П. Зверева и др. посвящены изучению влияния изменений климата на ресурсы подземных вод на территории России, получены количественные соотношения подземного стока с другими водобалансовыми элементами, что дает возможность прогноза изменения питания подземных вод в различных природно-климатических зонах Земли в связи с глобальными изменениями климата и интенсивным антропогенным воздействием на водный режим территорий [39]. Исследования проводились в бассейнах рек, с многолетними наблюдениями на

гидрометрических створах и метеорологических станциях (Волга, Дон, Кубань, Лена и др.). Составлены карты подземного стока различных регионов и стран, включая Карту гидрогеологических условий и подземного стока Мира. Основным содержанием этих карт являются удельные характеристики подземного стока — модули и коэффициенты [24].

Подробное исследование корреляционных связей подземного стока с космогенными факторами было проведено И. С. Зекцером [40].

Теоретические основы модельного подхода к изучению глобальных изменений подземного стока, связанных с современными и возможными в ближайшие десятилетия вариациями климата, заложены в работах Loaiciga H. A., Maidment D. R., Valdes J. B. VogelR., GarveyJ., SchwarzH.,LeipnikR. B. [120-123].

Глобальные исследования воздействия изменения климата на пресноводные ресурсы, в частности, восполнение запасов подземных вод, в настоящее время проводятся с использованием широкого ряда инструментов моделирования, основанного на балансовых расчетах от простого водного баланса, почвенно-водного баланса до гидрологических моделей [129, 135, 141]. В этих исследованиях для подземных вод использовались прогнозы моделей из CMIP5. По результатам моделирования были выполнены прогнозы возможных будущих изменений [129].

Палеоклиматические исследования изменений речного стока представлены в работах: Кислова А. В., Торопова П. А., Георгиади А. Г., Милюковой И. П., Кашутина Е. А. [3, 17]. Сценарные расчеты для определения изменения стока при заданных изменениях климатических характеристик (температуры, осадков) проводились М. В. Будыко с 1980 г [72].

Бельчиковым В. А. приводятся поливариантные прогнозы на основании модели Гидрометцентра, а также методом аналогии рассматривается влияние климатических факторов на сток с учетом их роли. Ковалевский В. С. использовал климатические прогнозы, основанные на различных палеореконструкциях для оценки влияния изменений климата на подземные воды [4].

В работах Döll P., Flörke M., Fiedler K., Kundzewicz Z W. проведено обобщение основных аспектов гидрогеологии, включая динамику количества и качества подземных вод, связанных с глобальными изменениями климата и антропогенного воздействия [95, 96]. Потенциальные воздействия подземных вод на глобальную климатическую систему в значительной степени неизвестны. Изменения климата, характеризующиеся изменением температуры, эвапотранспирации (прямо связанной с температурой), а также количества и режим атмосферных осадков, существенно влияют на ресурсы пресных подземных вод. Дополнительное влияние на речной и

подземный сток происходит при сокращении массы ледников и сокращения снежного покрова. Эти изменения, наблюдаемые в последние десятилетия, по прогнозам, ускорятся в течение XXI века. По мнению этих авторов, процессы питания и разгрузки подземных вод недостаточно полно представлены в моделях климата, поэтому целесообразно использование глобальных гидрологических моделей, таких как Water GAP Global Hydrology Model (WGHM) [95, 96].

Вклад в решение проблемы оценки подземного стока с помощью имитационных моделей внесли многие исследователи, в том числе сотрудниками Института Водных проблем Российской Академии наук М. В. Болгова, Д. Я. Ратковича, О. В. Сарманова, И. О. Сарманова [6, 7, 10, 66].

Разработкой гидрогеологических моделей для оценки взаимосвязи между изменениями климата и подземными водами в настоящее время занимаются на кафедре гидрогеологии и инженерной геологии МГУ им. М. В. Ломоносова. С. П. Поздняковым, С. О. Гриневским и др. рассмотрены модели и представлены различные методики моделирования на основе фактических метеорологических данных, на территории Московского артезианского бассейна и Калужской области. Выполнен количественный анализ прогнозной динамики глубины сезонно мёрзлого слоя в XXI в. с использованием климатических проекций по пяти МОЦАОАО из ансамбля моделей CMIP5, путем использования генератора прогнозных метеоусловий LARSWG5. [23, 64, 65].

Выводы по разделу 1.2. Неопределенность в климатических факторах обусловлена главным образом внутренней изменчивостью атмосферы, неточным моделированием реакций атмосферы на внешние и внутренние воздействия [109].

Взаимосвязь между изменением климата (климатическими факторами) и подземными водами является более сложной, чем те элементы, которые встроены в современные имитационные модели.

Оценка наблюдаемых изменений, связанных с климатическими вариациями для подземных вод, затруднена из-за дополнительных антропогенных воздействий, наблюдаемые тенденции изменений во многом связаны с этими дополнительными влияниями. Обнаружение изменений в системах подземных вод (изменения в расходах, уровнях), так и отнесение этих изменений к климатическим изменениям сложно из-за отсутствия соответствующих наблюдательных скважин и должного объема исследований.

Неоднозначность в прогнозных оценках изменений гидрометеорологического режима в будущем, недостаток данных наблюдений за стоком и водопотреблением определяют необходимость использования для расчетов характеристик стока

имитационных математических моделей, большинство из которых носит стохастический или детерминированно-стохастический характер.

1.3. Работы, посвящённые изучению территории Кольского полуострова

Ресурсы подземных вод, как и водные ресурсы в целом, являются климатически обусловленными природными ресурсами. Изменения климата неизбежны. Это – факт, подтверждающийся всей историей Земли. Наиболее важными климатическими факторами, с точки зрения оценки водных ресурсов, являются осадки, температура и испарение, которое определяется по данным о чистоте радиации на уровне земли, влажности воздуха, скорости ветра и температуре.

Работы, посвященные изучению климата, в той или иной степени, на территории Кольского полуострова в последние десятилетия, проведены следующими авторами: Н. Н. Филатов, Л. Е. Назарова, А. П. Георгиев, Р. П. Кочеткова, Н. Л. Фролова, А. В. Семенов, В. В. Дроздов, Н. П. Смирнов, А. Р. Анциферова, Е. Д. Сиеккинен, Д. В. Магрицкий, В. Н. Ожогина, М. И. Богдан, О. М. Чаус, В. В. Клименко, О. Н. Липка, И. В. Крыленко, Е. И. Лось, П. Н. Священников, Б. В. Иванов, И. А. Шикломанов, А. И. Шикломанов и др. [12, 18, 55, 69, 70].

Климат Кольского полуострова определяется его географическим положением за Полярным кругом и между Арктическим бассейном с севера и Европейским материком с юга, а также близостью теплого сектора Атлантики. Значительное влияние на климат оказывает теплое Нордкапское течение в Баренцевом море. Избыточное увлажнение является основной причиной обводненности и заболоченности территории.

Климатические изменения на территории Кольского полуострова, в частности, повышение среднесуточных температур, приводят к увеличению количества лесных пожаров. Изучаемая территория полуострова характеризуется распространением многолетней мерзлоты и болотных ландшафтов, что во многом определяет условия формирования подземного стока и специфику геоэкологической обстановки в регионе. Одной из проблем исследуемой территории является то, что распространение болот существенно ограничивает хозяйственную деятельность и ухудшает условия жизни населения [58, 68, 74]. Болота, аккумулируя большие объемы атмосферной влаги, влияют на геоэкологическое состояние, гидрогеологический и гидрологический режимы исследуемой территории. Оценкой подземного стока на заболоченных территориях в разное время плодотворно занимались многие исследователи. Гидрогеологические условия формирования подземного стока в реки на территории Карело-Кольского региона были изучены Зекцером И. С. в 1963 году [40].

Имеется общая закономерность в распределении осадков на территории Кольского полуострова: чем выше находится местность, тем больше объем осадков. Наименьшее количество осадков (400—500 мм/г) выпадает в долинах рек и на равнинной части территории. В районах со сложным рельефом осадки распределяются неравномерно и составляют 600—800 мм/г, а на вершинах наиболее крупных горных массивов (Хибинские и Ловозерские тундры, Мончетундра и Чунатундра) превышают 1000 мм/г [68].

Воздушные массы, поступающие в теплый период года с материка, имеют более высокое влагосодержание. Суммы осадков летних месяцев (июль—август) в 2 раза превышают суммы осадков зимних месяцев (февраль—март), что нехарактерно для морского климата [67].

Постоянный снежный покров в области устанавливается обычно в течение октября, сохраняется на вершинах Хибин и Чунатундры в среднем 220 дней, на остальной территории — 180 дней. В равнинных районах среднего-летнего высота снежного покрова в конце зимы — 70 см, на Мурманском побережье, где снег сдувается ветром, — 40 см [67].

В работе Романенко Ф. А. и Шиловцевой О. А. рассмотрены геоморфологические процессы в горах Кольского полуострова и изменения климата на его территории. Рассмотрены основные тенденции колебаний температуры воздуха и осадков на всей территории Кольского полуострова [67].

При оценке и обобщении характеристик естественного стока методами традиционных гидрологических расчетов основные трудности заключаются в отсутствии надежных данных, нестационарности временных рядов стока, динамике количественных и качественных показателей во времени и пространстве, недостатке данных наблюдений за стоком в естественных условиях его формирования [24, 25].

Современные исследования указывают на то, что практически все ряды межennaleго и минимального стока не удовлетворяют требованиям стационарности. В то же время известно, что для рядов минимального стока присуща неоднородность, обусловленная механизмом формирования минимального стока, что само по себе является препятствием для его достоверного статистического описания [2].

В своей работе И. А. Шикломанов отмечает, что важность взаимосвязи между подземными водами и климатическими изменениями не может быть преувеличена, так как 15% воды, используемой ежегодно — это исключительно подземные воды [70].

В работах С. Р. Kumar отмечается, что прямое воздействие изменения климата на ресурсы подземных вод зависит от изменения объема и распределения питания подземных вод. Таким образом, количественная оценка воздействия изменения климата

на ресурсы подземных вод требует не только надежного прогнозирования изменений основных климатических переменных, но и точной оценки питания подземных вод [116].

Вывод по разделу 1.3. В настоящее время среди научного сообщества нет единого мнения о том, как климатические вариации влияют на подземные воды, подземный сток на территории Кольского полуострова – один из наименее изученных в этом отношении регионов. Многие вопросы изучения характера и причин изменчивости климата и взаимосвязи с подземными водами остаются недостаточно раскрытыми. Дефицит достоверной информации о современном гидрогеологическом состоянии и его природно-антропогенных изменениях в последние десятилетия негативно сказывается на всем процессе управления водными ресурсами, а, следовательно, и его социально-экономическом развитии.

Выполняя такую работу, посвященную оценке взаимосвязи между климатическими факторами и подземными водами территории Кольского полуострова, опираемся на полученные данные из рядов стока. Для этих значений возможна оценка изменчивости во времени, но вычленение в этих изменениях только климатически обусловленных составляющих, остается по сей день трудно решаемой задачей.

2. Глава 2. Статистический анализ современных климатических изменений в северо-восточной части Балтийского щита

2.1. Создание и анализ массива эмпирических данных

Выбор массивов данных гидрометеорологических измерений для анализа их изменений в значительной мере предопределяет получаемый диагноз климата. Межправительственной группой экспертов по климатическим изменениям [159] отмечено, что использование не рекомендованных Всемирной Метеорологической Организацией (ВМО) данных инструментальных метеорологических наблюдений – одна из главных причин необоснованных суждений о масштабах и механизмах современных изменений климата. На территории России, кроме сети Росгидромета, являющегося членом ВМО, функционируют пункты метеорологических наблюдений других ведомств (Минобороны, Государственной службы гражданской авиации Министерства транспорта Российской Федерации, Министерства здравоохранения и социального обеспечения и ряда других). Ведомственные сети, по экспертной оценке, составляют 30–40% общего числа пунктов метеорологических наблюдений. Эти пункты метеонаблюдений функционируют независимо от метеорологической сети Росгидромета и поэтому по используемой методике и режиму не интегрируются в общенациональную сеть наблюдений за состоянием окружающей природной среды.

Но даже данные не всех станций и постов Росгидромета можно использовать для оценки изменений климата. Необходимым условием привлечения данных той или иной станции Росгидромета является наличие длительных репрезентативных достоверных и однородных наблюдений с малым числом пропусков. Под длительностью понимается, как минимум, интервал, рекомендованный ВМО, для оценки изменений климата равный 30 годам. Под достоверностью понимается надежность (качество) данных наблюдений и расчетных прогностических модельных величин, полученных специалистами под контролем национальных метеослужб членом ВМО. Репрезентативность эмпирического массива климатической переменной – свойство используемых данных отражать закономерности многолетних изменений этой климатической переменной в области (пространственном фрагменте) U , климат которой изучается. Под однородностью следует понимать сравнимость значений величин климатической характеристики в различных интервалах изучаемого периода.

В основу данной работы положены массивы данных о приземной температуре воздуха и количестве атмосферных осадков с месячной дискретностью глобальной наблюдательной сети, разработанные и продлеваемые Центром Хэнли (Henley Centre) в университете Восточной Англии под эгидой Королевской метеорологической службы Великобритании (CRU – Climatic Research Unit). Массивы CRU получены

интерполяцией аномалий метеорологических характеристик (по отношению к периоду 1961-1990 гг.) на метеостанциях в узлы широтно-долготной сетки $5 \times 5^\circ$ и $0.5 \times 0.5^\circ$, которая задана топографической моделью с использованием метода сплайнов с последующим восстановлением абсолютных значений с помощью архива норм за 1961-1990 гг. IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change) квалифицирует массивы CRU, как наиболее соответствующие требованиям, предъявляемым к эмпирическим данным, для обнаружения и оценки изменений климата [159]. Согласно [40], архив CRU воспроизводит температурное поле и поле атмосферных осадков на территории России с наименьшей погрешностью.

Массивы CRU дополнены двумя климатическими архивами, разработанными и продлеваемыми в Институте глобального климата и экологии Росгидромета и РАН и во ВНИИГМИ-МЦД [78].

В работе анализируются усредненные оценки для календарных сезонов и года в целом. В качестве сезонов рассматривались: зима (декабрь-февраль); весна (март-май); лето (июнь-август) и осень (сентябрь-ноябрь). За год принимался период с декабря предыдущего года по ноябрь рассматриваемого.

Пространственно осредненные значения аномалий климатических переменных (температуры приземного воздуха и количества атмосферных осадков) рассчитываются в два этапа. На первом, территория региона разбивается регулярной сеткой на ячейки 2.5 градуса широты на 5 градусов долготы, и в каждой ячейке сетки рассчитывается среднее арифметическое из значений аномалий на попавших в эту ячейку станциях. Затем выполняется взвешенное осреднение по ячейкам с весами, пропорциональными площади пересечения ячейки с территорией региона. Оценки аномалий получены как отклонения от средних за рекомендованный ВМО базовый период 1961-1990 гг. Аналогичным образом, по данным о станционных «нормах» (средних многолетних за базовый период) для каждого региона рассчитываются «региональные нормы». Регионально осредненные значения самих климатических переменных рассчитываются суммированием «региональных норм» и «региональных аномалий» (этот алгоритм уменьшает смещение оценок, вызываемое пропусками в рядах наблюдений). Все расчеты, включая определение принадлежности ячейки к региону, площади их пересечения и ячейечных весовых множителей, выполняются автоматически, на основании заданной замкнутой ломаной, ограничивающей территорию региона.

Временные ряды температуры приземного воздуха и количества атмосферных осадков, рассматриваются в интервалах с 1936 по 2019 гг. и с 1976 по 2019 гг. Левые границы рассматриваемых интервалов определены годом, к началу которого (1936 г.) сформировалась основная сеть метеорологических наблюдений на постсоветской

территории (до этого в архивах метеорологических данных имеются массовые пропуски) и годом (1976 г.), с которого, по мнению многих исследователей [79, 159], климатические изменения ускорились.

Необходимо отметить, что многолетние изменения осадков эмпирически обеспечены значительно хуже, чем приземная температура воздуха. Такая ситуация объясняется объективными и субъективными причинами. Объективная причина – более сложная физическая природа самого явления. В частности, существенно большая в процентах к «норме» межгодовая осредненная по сезонам изменчивость и существенно меньшая связность пространственно-временного распределения. Субъективные причины обусловлены имевшими место существенными различиями в методике наблюдений в разные периоды. Из-за дискретного характера пространственного поля осадков для их изучения требуется большее число метеостанций, чем для мониторинга температуры воздуха.

В настоящее время эталонного массива с данными по атмосферным осадкам за период инструментальных наблюдений на всей сети российских станций не существует. Организация работы по внедрению в практику новых методов обработки данных текущих гидрометеорологических наблюдений и соответствующему перерасчету, и анализу архивных данных об атмосферных осадках является исключительно актуальной и трудоемкой задачей.

В данной работе оценки изменения атмосферных осадков по сезонам и годовые и получены по массиву данных о месячных суммах осадков, которые содержат в интервале до 1966 года поправки на смачивание [83] и стандартное приведение данных дождемера к показаниям осадкомера [82]. Данные после 1966 г. до настоящего времени получены из телеграмм "КЛИМАТ" и содержат поправки на смачивание, введенные наблюдателем в каждое измерение [83]. Согласно [25, 26] этот массив данных по осадкам следует рассматривать для территории РФ как наиболее полный, однородный и репрезентативный на сегодняшний день.

За единицу измерения атмосферных осадков приняты месячные суммы осадков (мм/месяц). Сезонные и годовые осадки представляют собой средние из месячных сумм за месяцы рассматриваемого сезона (года). Исследуемые ряды атмосферных осадков представлены в абсолютных аномалиях, т. е. отклонениях от соответствующего среднего (нормы) за 1961–1990 гг., либо в относительных аномалиях – процентах от этих норм.

Использованные в настоящей работе архивы эмпирических данных апробированы в работах авторов [34, 35].

2.2. Методика статистического анализа

Для статистического описания многолетних изменений характеристик климата можно использовать три основных вида модели временного ряда: модель стационарного ряда с присущей ему естественной изменчивостью; модель линейного тренда и модель ступенчатого перехода от одного стационарного состояния к другому. Каждый вид модели отражает тот или иной физический механизм, действующий в климатической системе [3]. Изменения в виде линейного тренда возникают в слабоинерционной равновесной системе, которая быстро откликается на внешние воздействия. Ступенчатые изменения присущи неравновесной системе, компенсирующей внешние воздействия до тех пор, пока они не превышают порогового значения, после чего система быстро переходит на новый, часто квазистационарный уровень. Стационарный временной ряд может быть особым состоянием как равновесной, так и неравновесной систем. В первом случае это проявление случайных внешних воздействий, во втором – период стабильного состояния, в который величина внешнего воздействия не превысила критического порога значений. Критерием эффективности выбора модели может служить стандарт отклонений временного ряда от принятой модельной аппроксимации.

Наиболее распространенный способ анализа изменений климата — разложение вектор-функции $\bar{f}(\bar{r}, t)$ на тренд $\bar{f}_0(\bar{r}, t)$ и шум $\bar{\varphi}(\bar{r}, t)$:

$$\bar{f}(\bar{r}, t) = \bar{f}_0(\bar{r}, t) + \bar{\varphi}(\bar{r}, t) \quad (2.2.1)$$

Это векторное равенство означает, что все составляющие, соответствующие выбранным (K) метеорологическим переменным, представляются в виде суммы тренда и шума:

$$f_k(\bar{r}, t) = f_{k0}(\bar{r}, t) + \varphi_k(\bar{r}, t) \quad (2.2.2)$$

По смыслу введенных понятий, тренд — медленно меняющаяся часть, а шум — быстро меняющаяся.

При сравнении климатов в области U на отрезках времени $[t_1, t_2]$ и $[t'_1, t'_2]$ могут обнаруживаться различия как медленных составляющих климатических переменных, так и быстрых, т.е. могут меняться свойства случайных полей E_k . Изменение климата или отдельных климатических характеристик конкретной географической области за некоторый интервал времени может быть описано двумя способами. Во-первых, разностью между значениями тех или иных гидрометеорологических характеристик за этот период по сравнению с нормой (базовым периодом) или с другим интервалом времени. Во-вторых, статистическим диагнозом многолетнего междугодичного хода климатических переменных.

В качестве меры интенсивности климатических изменений за указанный интервал времени используется коэффициент линейного тренда, определенный по методу наименьших квадратов и характеризующий среднюю скорость изменений климатической переменной, соответствующую тренду. В качестве меры существенности тренда используется доля дисперсии климатической переменной, объясняемая трендом (достоверность тренда или коэффициент детерминации), выраженная в процентах от полной дисперсии климатической переменной за рассматриваемый интервал времени (R^2).

При оценке линейного тренда предполагается, что значение наблюдаемой переменной (x) линейно меняется со временем (t), однако также подвержено влиянию факторов ненаправленной изменчивости:

$$x(t) = a + bt + \xi(t) \quad (2.2.3)$$

Здесь (a) и (b) — константы, а $\xi(t)$ — независимые реализации центрированной случайной величины (ξ) с дисперсией (D). Оценки (a) и (b) получаем методом наименьших квадратов, т. е. выбираются те значения (a) и (b), при которых достигается минимум суммы:

$$[\sum_{n=1}^N (x(t_n) - a - bt_n)^2] \quad (2.2.4)$$

Этот метод дает следующие оценки (b) и (a) соответственно:

$$b^{\wedge} = \sum_{n=1}^N (x(t_n) - M[x])(t_n - M[t]) / \sum_{n=1}^N (t_n - M[t])^2 \quad (2.2.5)$$

$$a^{\wedge} = M[x] - b^{\wedge} M[t] \quad (2.2.6)$$

Где

$$M[x] = (\sum_{n=1}^N x(t_n)) / N \quad (2.2.7)$$

$$M[t] = (\sum_{n=1}^N t_n) / N \quad (2.2.8)$$

Эти оценки являются статистически не смещенными, т. е. их математическое ожидание равно значению оцениваемых (но нам неизвестных) параметров (b) и (a). Чтобы понять, как далеко могут находиться полученные оценки от истинных (нам неизвестных) значений (b) и (a), надо получить представление об их случайных ошибках. Для этого, во-первых, вычислим “остатки”, т.е. отклонения наблюдаемых значений от предписываемых линейной зависимостью, найденной методом наименьших квадратов:

$$\begin{aligned} \xi^{\wedge}(t_n) - a^{\wedge} - b^{\wedge} t_n, \\ n = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (2.2.9)$$

В предположении о нормальности отклонений (ξ) отклонение ($b^{\wedge} - b$) будет также распределено нормально, причем статистически независимая от ($b^{\wedge} - b$) оценка ($s^{\wedge}$) его ошибки (s) вычисляется по формуле:

$$s^{\wedge} = \sqrt{\frac{\frac{1}{N-2} \sum_{n=1}^N (\xi^{\wedge}(t_n))^2}{\sum_{n=1}^N (t_n - M[t])^2}} \quad (2.2.10)$$

В числителе (11) — несмещенная оценка ($D^{\wedge}$) дисперсии (D). Распределение отношения

$$(b^{\wedge} - b) / s^{\wedge} \quad (2.2.11)$$

есть распределение Стьюдента с ($N - 2$) степенями свободы. Из этого следует, что критерием значимости тренда или полезности коэффициента тренда (b) может служить соотношение

$$b^{\wedge} \square \xi s^{\wedge} \quad (2.2.12)$$

где (ξ) — соответствующий квантиль распределения Стьюдента. Конкретное значение (ξ) зависит от длины ряда наблюдений (N) и уровня значимости. На практике статистическая значимость углового коэффициента линейного тренда (b) определяется при помощи Т-статистик. Наблюдаемое значение ($T_{\text{набл.}}$) определяется путем деления значения углового коэффициента на стандартную для данного ряда ошибку вычисления. По таблицам математической статистики или используя функцию Excel распределения Стьюдента (СТЮДРАСПОБР) находим Т-критическое двустороннее при заданной вероятности ошибочного вывода (обычно 0.05 или 0.01). Только при ($T_{\text{набл.}}$) ($T_{\text{крит.}}$), можно делать вывод о полезности углового коэффициента линейного тренда при том или ином уровне значимости (обычно 95% или 99 %).

Кроме оценки полезности коэффициента тренда, при анализе многолетних изменений любых эмпирических данных принципиально важно иметь статистически обоснованный ответ на вопрос: являются ли наблюдаемые направленные изменения неслучайными. Для этого используем хорошо известный F-тест или критерий Фишера. На практике F-тест сводится к сравнению наблюдаемого значения F-статистики с ее критическим значением при заданном уровне значимости. Если значение наблюдаемой F статистики больше критического значения при данном уровне значимости, то нулевая гипотеза отвергается. В противном случае модель признается незначимой.

Для оценки трендов во всех исследуемых рядах гидрометеорологических характеристик, определяющих ресурсы пресных подземных вод, были рассчитаны

стандартные ошибки парной линейной регрессии климатических переменных (x) на время (t) – среднеквадратическая ошибка оценки климатической переменной (x) согласно (2.2.3), стандартные ошибки угловых коэффициентов тренда (a) и коэффициентов (b) из уравнения (2.2.3). Также были вычислены первые и вторые моменты, получены центрированные ряды, вычислены центральные моменты 2-го порядка, определены границы интервалов, соответствующие коэффициенту доверия 0.05 и 0.01 (95% и 99 % уровни значимости).

Проведен анализ действительности (реальности) многолетних изменений исследуемых гидрометеорологических характеристик. Выявленные изменения считались действительными (реальными), если их величина превышала ошибки оценки этих изменений.

2.3. *Диагноз многолетних изменений климатических переменных, определяющих естественные ресурсы подземных вод*

Необходимо заметить, что большинство известных авторам публикаций, посвященных выявлению и анализу тенденций в многолетнем ходе регионально осредненных эмпирических климатических данных, ограничиваются оценкой угловых коэффициентов линейных трендов. Убедительный пример этого утверждения – последний Доклад МГЭИК [159]. В отдельных (лучших) случаях полученные значения угловых коэффициентов дополнены оценкой вклада дисперсии тренда в общую дисперсию процесса. Пример этого утверждения – Второй Оценочный Доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации [79]. Неиспользование хорошо известных критериев статистической значимости угловых коэффициентов и случайности оценок коэффициентов детерминации обуславливает радикализацию суждений о тенденциях в многолетних изменениях гидрометеорологических характеристик.

Температура приземного воздуха

Многолетние изменения сезонных значений температуры приземного воздуха, осредненные по территории Кольского п-ова, представлены на рисунке 2.3.1. Результаты статистического анализа многолетних изменений среднегодовых и сезонных значений температуры воздуха приведены в таблице 2.3.1.

Визуальный анализ многолетнего хода по графикам (рис. 2.3.1) провоцирует у неподготовленного пользователя формирование иллюзорного суждения о существенности линейных трендов приземной температуры воздуха. К примеру, может сложиться впечатление о наличии существенного положительного тренда в зимних

температурах. Однако оценки параметров этого тренда (табл. 2.3.1) не подтверждают такое суждение.

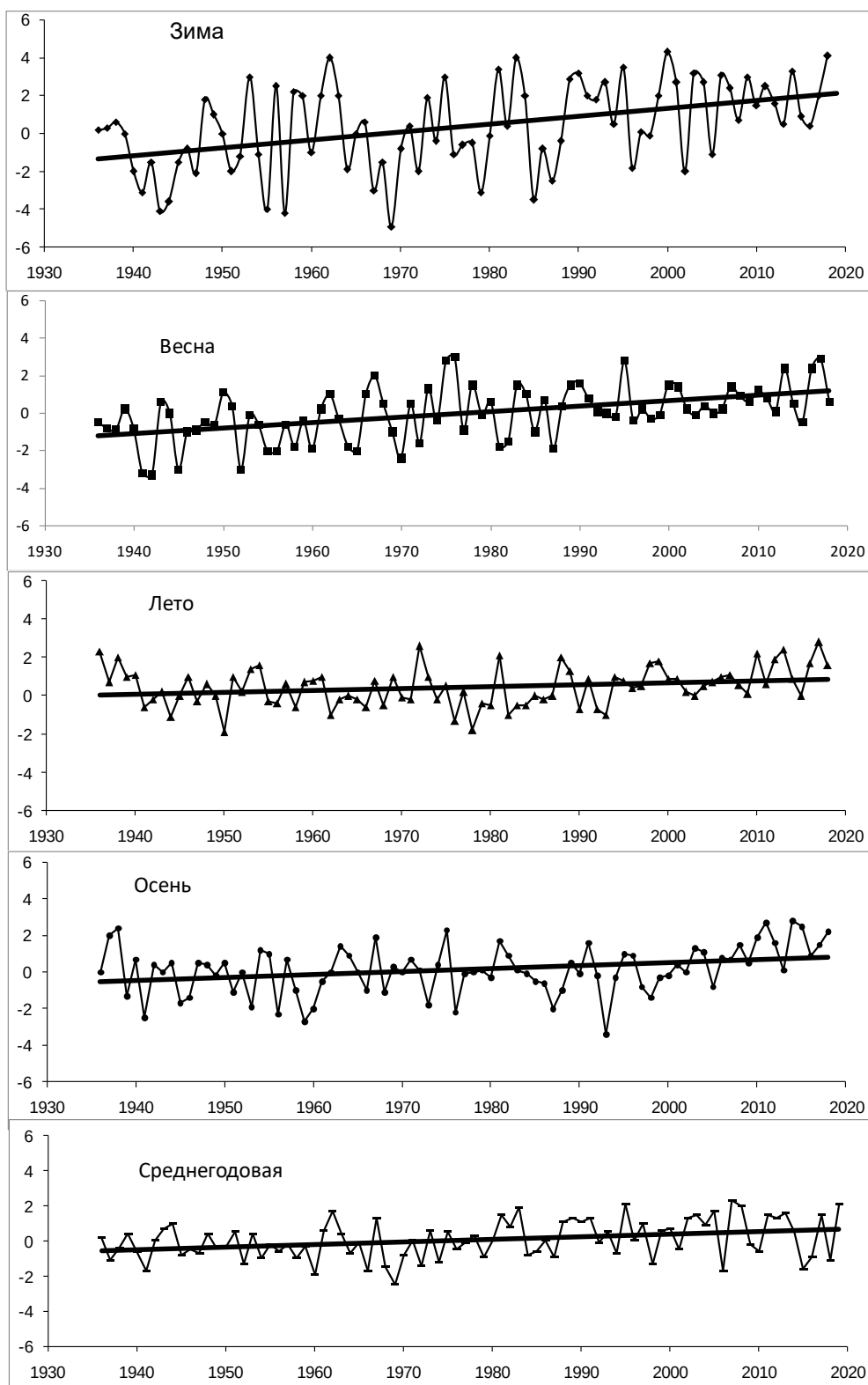


Рис. 2.3.1. Изменения аномалий сезонной и среднегодовой температуры приземного воздуха, осредненных по территории Кольского полуострова. Аномалии рассчитаны как отклонения от нормы за 1961—1990 гг. Жирная прямая показывает линейный тренд.

Таблица 2.3.1. Оценки линейного тренда температуры приземного воздуха за 1936-2019 гг. и 1976-2019 гг.

Параметр/ Сезон, Интервал	$\sigma^{\wedge}$	b	Se_b	Se_x	R^2	$F_{\text{тест}}$	$T_{\text{тест}}$
Зима							
1936-2019	2.3	0.041	0.011	2.18	18	-	$\pm$
1976-2019	2.2	0.062	0.035	2.20	34	-	+
Весна							
1936-2019	1.4	0.028	0.017	1.24	22	-	-
1976-2019	1.1	0.037	0.028	1.11	28	$\pm$	+
Лето							
1936-2019	0.9	0.007	0.010	1.00	6	-	-
1976-2019	1.0	0.029	0.015	0.93	14	-	$\pm$
Осень							
1936-2019	1.2	0.016	0.006	1.21	9	-	-
1976-2019	1.2	0.026	0.016	1.06	17	$\pm$	$\pm$
Год							
1936-2019	1.1	0.015	0.027	1.23	11	-	-
1976-2019	1.1	0.023	0.024	0.82	16	$\pm$	$\pm$

Обозначения к таблице:

$\sigma^{\wedge}$ - стандартное отклонение – оценка среднеквадратического отклонения относительно её математического ожидания на основе несмещённой оценки её дисперсии;

$\Delta x/\text{год}$ - угловой коэффициент линейного тренда ($^{\circ}\text{C} / \text{год}$ или мм/мес·год

Se_b -стандартная ошибка для углового коэффициента;

Se_x - стандартная ошибка регрессии – среднеквадратическая ошибка оценки климатической переменной (x) согласно (4);

$F_{\text{тест}}$ - тест на неслучайность оценки достоверности тренда - статистический критерий, тестовая статистика которого при выполнении нулевой гипотезы имеет распределение Фишера (F-распределение).

$T_{\text{тест}}$ – критерий Стьюдента или тест на статистическую значимость углового коэффициента тренда;

R^2 , % - вклад тренда в общую дисперсию процесса (достоверность тренда, коэффициент детерминации);

в столбцах (Fтест) и (Tтест) знак (+) означает положительные результаты теста на уровнях значимости 0.05 и 0.01, знак ($\pm$) означает положительный результат теста на уровне значимости 0.05 и отрицательный – на уровне значимости 0.01, знак (-) означает отрицательный результат теста на уровнях значимости 0.05 и 0.01.

Примечание: жирным курсивом выделены интервалы или значения (таблицы по СПО), в которых оценки линейных трендов статистически значимы на уровне 1% по критериям Фишера и Стьюдента.

Среднегодовые и сезонные значения температуры воздуха в интервалах 1936-2019 и 1976-2019 гг. проявляют тенденцию к росту. Однако статистически значимые на 99% уровне значимости положительные линейные тренды характерны только для зимних и весенних значений температуры приземного воздуха в интервале 1976 – 2019 гг. При этом угловые коэффициенты зимних и весенних трендов температуры в интервале 1976 – 2019 гг. равны $0.062^{\circ}\text{C}/\text{год}$ и $0.043^{\circ}\text{C}/\text{год}$, а коэффициенты детерминации равны 34% и 28% соответственно. Однако, по наблюдаемым значениям распределения Фишера зимние и весенние изменения температуры на уровне значимости 0.01 случайны. Стандартные ошибки определения угловых коэффициентов линейных трендов температуры воздуха составляют $0.01\text{-}0.35^{\circ}\text{C}/\text{год}$ и сопоставимы с значениями угловых коэффициентов Многолетние изменения температуры воздуха в обоих интервалах в другие сезоны статистически незначимы и не случайны уже на 95% уровне значимости. Это объясняется большой межгодовой изменчивостью и, как следствие, малым вкладом дисперсии тренда в общую дисперсию процесса.

В целом за год и во все сезоны, кроме зимы, в среднем по территории северо-восточной части Балтийского щита гипотеза об отсутствии потепления уверенно отвергается на уровне значимости 0.01.

Анализ межгодовых изменения среднегодовых приращений температуры приземного воздуха (рис.2.3.2) показал, что для их описания применима модель процесса случайного блуждания с межгодовыми приращениями близкими к белому шуму при отсутствии детерминированного тренда.

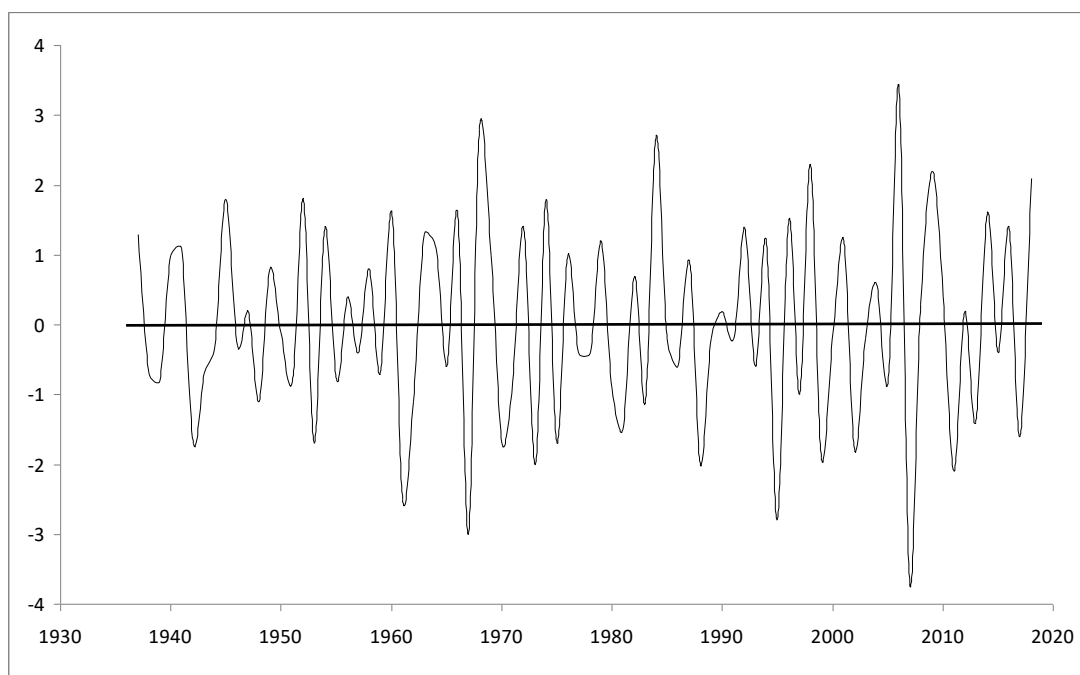


Рис. 2.3.2. Межгодовые изменения среднегодовых приращений температуры приземного воздуха. Жирная прямая показывает линейный тренд.

Атмосферные осадки.

Среднегодовые и сезонные значения атмосферных осадков, осредненные по территории северо-восточной части Балтийского щита в интервалах 1936 – 2019 гг. и 1976 – 2019 гг., не характеризуются статистически значимыми линейными трендами на уровне значимости 99% и 95% (рис. 3, табл. 2). Статистически недостоверный отрицательный тренд 1-го порядка (угловой коэффициент -0.59 мм/мес.год, вклад дисперсии, обеспеченной трендом, в общую дисперсию процесса составляет 10%, стандартная ошибка определения углового коэффициента 0.15 мм, стандартная ошибка регрессии 10 мм, наблюдаемая статистика Стьюдента 1.9) наблюдается в летних величинах осадков в интервале 1976 – 2019 гг.

В остальные сезоны и в годовых значениях атмосферных осадков в обоих рассматриваемых интервалах выявлены статистически незначимые положительные тренды с угловыми коэффициентами от 0.01 до 0.18 мм/год и коэффициентами детерминации не более 0.17.

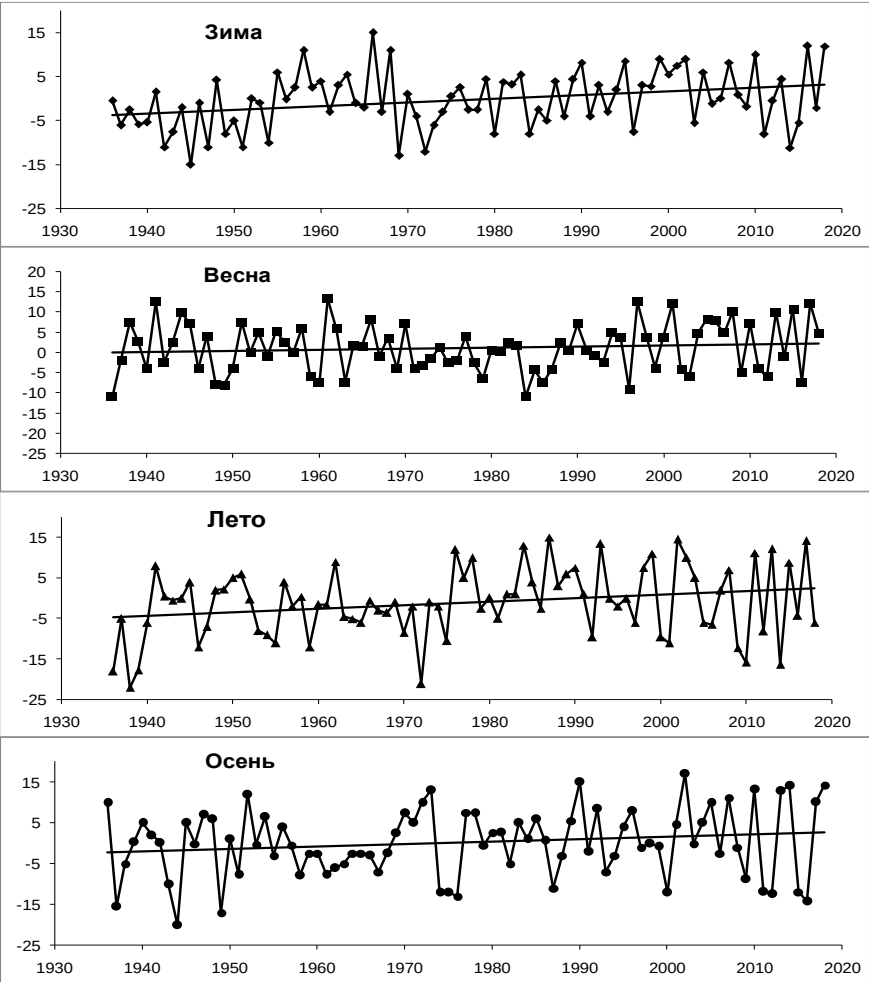


Рис. 2.3.3. Сезонные аномалии месячных сумм осадков (мм/месяц), осредненные по территории Кольского полуострова за 1936—2019 гг. Аномалии рассчитаны как отклонения от среднего за 1961—1990 гг.Прямая показывает линейный тренд.

Таблица 2.3.2. Оценки линейного тренда сезонных и годовых сумм атмосферных осадков за 1936-2019 гг. и 1976-2019 гг.

Параметр/ Сезон, Интервал	$\sigma^{\wedge}$	b	Se_b	Se_x	R^2	$F_{тест}$	$T_{тест}$
Зима							
1936-2019	6.3	0.11	0.06	5.9	4	-	±
1976-2019	6.4	0.09	0.05	5.7	13	-	-
Весна							
1936-2019	5.8	0.02	0.02	5.7	1	-	-
1976-2019	6.1	0.18	0.09	5.8	11	-	±

Лето							
1936-2019	0.9	0.007	0.005	1.00	6	-	±
1976-2019	1.0	0.059	0.015	0.93	10	±	-
Осень							
1936-2019	1.2	0.016	0.006	1.21	9	-	-
1976-2019	1.2	0.039	0.016	1.06	17	-	-
Год							
1936-2019	1.1	0.015	0.027	1.23	11	-	-
1976-2019	1.1	0.043	0.014	0.82	16	-	-

Обозначения: те же, что в таблице 1

Диагноз многолетних изменений климатических характеристик представляет собой интерпретацию результатов совокупности оценок, полученных при анализе их парной регрессии 1-го и 2-го порядков на время.

1) Достоверность линейного приближения многолетних изменений температуры приземного воздуха в интервалах 1936-2019 гг. на территории Кольского полуострова не превышает 24%, а в большинстве случаев значительно ниже. Величины угловых коэффициентов линейных трендов температуры приземного воздуха варьируются в пределах 0.04-0.001 °С/год. в зависимости от сезона и масштаба временной и пространственной фрагментации примерно одинаково. Коэффициенты при квадратном члене уравнений тренда 2-го порядка, характеризующие знак и значение ускорения динамики близки к нулю в третьем знаке после запятой.

Математическое ожидание межгодовых приращений температуры приземного воздуха практически равно нулю и не меняется со временем.

Для описания многолетних изменений температуры приземного воздуха в интервалах 1936-2019 гг. и 1976-2019 гг. оптимальна модель случайного процесса с независимыми приращениями – процесса случайного блуждания с межгодовыми приращениями близкими к белому шуму при отсутствии детерминированного тренда.

2) Для описания многолетних изменений сезонных и годовых сумм атмосферных осадков в интервалах 1936-2019 гг. и 1976-2019 гг. на территории северо-восточной части Балтийского щита предпочтительна модель стационарного ряда с присущей ему естественной изменчивостью.

Диагноз многолетней динамики основных климатических переменных свидетельствует об отсутствии статистически значимых на уровне значимости даже

0.05 направленных изменений гидрометеорологических характеристик, определяющих питание подземных вод на территории Кольского полуострова.

Оценка неопределенностей – необходимое условие количественного определения любой физической величины, в том числе, выявления и оценивания влияния многолетних изменений характеристик климата на подземные воды [30, 155]. К сожалению, в подавляющем числе исследований этому вопросу не уделяется должного внимания.

Неопределенности можно классифицировать в зависимости от их происхождения на два основных типа – “неопределенности значений” и “структурные неопределенности”.

Неопределенности значений возникают, когда данные неточны или не в полной мере представляют интересующее нас явление. Неопределенности значений обусловлены такими объективными причинами как поступательное развитие методики наблюдений, повышающее качество массива гидрометеорологических данных, а также недостаточность и неравномерность плотности сети станций наблюдений.

Структурные неопределенности субъективны, поскольку их источником является выбор той или иной, априори, не полностью адекватной методики пространственно-временной фрагментации данных наблюдений.

Неопределенности значений возникают, когда данные неточны или не в полной мере представляют интересующее нас явление. Неопределенности значений обусловлены такими объективными причинами как поступательное развитие методики наблюдений, повышающее качество массива гидрометеорологических данных, а также недостаточность и неравномерность плотности сети станций наблюдений.

Статистически и физически значимые неопределенности значений атмосферных осадков обусловлены меняющейся методикой и срочностью их измерения, а также недостаточной плотностью наблюдательной сети и, следовательно, неодинаковой репрезентативностью данных наблюдений.

Данные, полученные в 20 веке, и текущие, поступающие по каналам связи, по-прежнему содержат существенную инструментальную неоднородность, связанную, в частности, с недоучетом твердых осадков, особенно при метелях и сильных ветрах. Помимо прямого смещения в оценке количества осадков зимой (их занижение по сравнению с реальными), этот “недоучет” в условиях меняющегося климата может привести к появлению ложных трендов. Например, уменьшение скорости приземного ветра способствует увеличению измеренных осадков в результате уменьшения их потерь при измерении (лучше улавливаются твердые и слабые осадки). Интенсивное потепление климата, в свою очередь, может создать иллюзию увеличения осадков

вследствие уменьшения повторяемости твердых осадков в пользу жидких и т. п. Этот и другие подобные эффекты следует иметь в виду при выявлении и оценках трендов. Представляется, что полноценно устранить инструментальную неоднородность удастся лишь после завершения работ по созданию эталонного массива наблюдений за осадками в России за весь период инструментальных наблюдений.

С учетом вышесказанного, любые выводы о тенденциях регионально осредненных изменений климатических характеристик не могут считаться исчерпывающими. Неоднозначность – неизбежное следствие объективных и субъективных неопределенностей, возникающих при выявлении и количественном определении климатических трендов.

3. Глава 3. Оценка влияний вариаций климата на подземный сток северо-восточной части Балтийского щита

3.1. Гидрогеологические условия и факторы формирования стока в северо-восточной части Балтийского щита

Кольский полуостров расположен на северо-западе России и представляет собой восточную окраину крупной физико-географической страны — Фенноскандии. На севере и востоке территория омывается водами Баренцева и Белого морей. Западная граница региона не является природным рубежом и совпадает с государственной границей России с Финляндией и Норвегией (рис.3.1.1) [81].

С севера на юг территория протянулась на 10° почти от 70° с. ш. в районе полуострова Рыбачий до 60° с. ш. у южной окраины Ладожского озера, что составляет свыше 1000 км. С запада на восток территория протягивается от 28° в. д. (южная часть Карелии) до 41° в. д., более чем на 500 км [81].

Кольский полуостров расположен в пределах Балтийского кристаллического щита, поэтому относятся к наиболее древней части Европы. Однако природа региона довольно молода, так как здесь находился центр четвертичного оледенения. Последний ледник покинул территорию несколько тысяч лет назад, поэтому все ландшафт образующие процессы действовали здесь сравнительно короткое время, «накладываясь» на древнейшую основу. Климат региона формируется под влиянием Атлантики и теплого Норд капского течения, поэтому он довольно мягкий и влажный для этих широт. Территория покрыта густой сетью озер и рек, много заболоченных участков. Большая часть региона лесная, с преобладанием сосновых лесов. Север занят тундрой и лесотундрой. Все это — специфические черты природы, отличающие Кольский полуостров и Карелию от Русской равнины и позволяющие отнести их к

другой физико-географической стране — Фенноскандии, большая часть территории которой находится за пределами России [81].

В изучении природы региона принимали участие многие отечественные исследователи: Н. В. Кудрявцев, Б. М. Куплетский, А. Е. Ферсман, Г. Д. Рихтер, А. А. Григорьев, А. А. Полканов, А. А. Шарков, М. А. Лаврова, Г. С. Бискэ, С. И. Макиевский, Ю. А. Мещеряков, Н. И. Николаев, А. А. Никонов, С. А. Стрелков и многие другие. Наибольший интерес ученых привлекло геологическое строение территории и древнее оледенение, поэтому много работ посвящено литогенной основе региона.



Рис.3.1.1 Местоположение Кольского полуострова на карте РФ [81].

Рельеф. Орографический рисунок Кольского полуострова и Карелии достаточно прост. Наибольших высот территория достигает в западной части Кольского полуострова, имеющей расчлененный рельеф. Здесь расположены отдельные горные массивы с плоскими вершинами, разделенные депрессиями. Их высоты достигают 900-1000 м. Лишь единичные вершины Хибин (г. Часначорр — 1191 м), Ловозерских Тундр и Мончетундры превышают 1000 м. Для восточной половины Кольского полуострова характерен более спокойный волнистый рельеф с преобладающими высотами 150-250 м. Среди волнистой равнины возвышается гряда Кейвы (397 м), состоящая из отдельных цепей, вытянутых с северо-запада на юго-восток вдоль центральной части полуострова. Хотя рельеф Кольского полуострова достаточно пересеченный, около 30% поверхности занято болотами. Особенно богата ими Понойская низменность Кольского полуострова [81].

Гидрография. Кольский полуостров и Карелия богаты поверхностными водами. Модуль стока составляет здесь 7- 12 л/с×км², а в горах возрастает до 25-30 л/с×км². На

территории региона очень много озер — более 170 тыс. Здесь находится крупнейшее озеро Европы — Ладожское (17,7 тыс. км²). Приближается к 10 тыс. км² площадь Онежского озера (9,7 тыс. км²). Среди других озер выделяются своей величиной Топозеро, Имандра, Сегозеро, Пяозеро, Выгозеро, имеющие площадь от 500 до 1000 км², и ряд более мелких озер. Обилию озер способствуют как климатические условия, так и большое количество котловин ледникового и тектонического происхождения. Озера связаны между собой короткими и порожистыми реками. Здесь насчитывается около 40 тыс. рек общей протяженностью не менее 83 тыс. км. Вместе они образуют сложные озерно-речные системы — специфическую черту природы данного региона. Наиболее крупными реками Кольского полуострова являются: Поной (длина 410 км), Иоканьга (197 км), Воронья (155 км). В питании рек основная роль принадлежит талым снеговым водам (40-45 %), около 35 % дают дождевые воды, роль грунтового питания ниже (20-25 %).

Сложность геологических и орографических условий, наличие вблизи земной поверхности водоупорной кристаллической основы, большое количество выпадающих осадков и относительно малое испарение влияют на характер гидрографической сети Кольского полуострова. Здесь весьма развита речная сеть, а по количеству озер полуостров занимает одно из первых мест в России; низменные и слаборасчлененные участки территории нередко представляют собой крупные заболоченные пространства.

Реки Кольского полуострова принадлежат к бассейнам двух морей — Баренцева и Белого; водораздел проходит с запада, на восток — от государственной границы с Финляндией к горлу Белого моря через Сальные, Хибинские, Ловозерские тундры и горную гряду Кейвы. Отсюда на север и юг текут главнейшие реки полуострова. Занимая срединное положение, водораздел обуславливает небольшую длину стекающих с него рек, сбросовый характер их продольных профилей и небольшие площади водосборов. В широтном направлении текут лишь реки Лотта, Йоканьга и Поной.

Все реки Кольского полуострова в зависимости от рельефа и других географических особенностей можно разделить на три основные группы: полуравнинные, озерного типа и горные. Всего на Кольском полуострове насчитывается 20616 рек. Самой протяженной является р. Поной длиной 426 км, самой большой рекой по площади водосбора — р. Тулома (21500 км², из них 18200 на территории России).

Климат. На климат Кольского полуострова большое влияние оказывает положение региона на крайнем северо-западе России. Им обусловлено отепляющее влияние Атлантики и Нордкапского течения, проходящего близ Мурманского побережья, благодаря чему климат здесь менее суров и более важен, чем в других

регионах России, лежащих на тех же широтах. Однако северное положение определяет значительное влияние холодных арктических воздушных масс и небольшую величину солнечной радиации, участвующей в климатообразующих процессах. Над акваторией Баренцева моря зимой и летом проходят циклоны арктического фронта, существенно влияющие на климат региона.

Зимой на Кольском полуострове, почти полностью лежащем за полярным кругом, устанавливается полярная ночь, которая продолжается на полуострове Рыбачий два месяца, в Мурманске свыше месяца (36 дней), а в Кандалакше — восемь дней. В течение этого времени солнце совсем не показывается над горизонтом. Даже в южных районах Карелии оно поднимается невысоко, и поступающая радиация крайне мала. Однако, несмотря на это, зима здесь достаточно мягкая, что обусловлено особенностями атмосферной циркуляции.

В зимнее время развивается циклоническая деятельность на Баренцевоморской ветви арктического фронта, что определяет господство над территорией Кольского полуострова устойчивого юго-западного потока более теплого морского воздуха умеренных широт с температурами, близкими к 0°C , либо континентального, образовавшегося за счет трансформации морского; его температура ниже ($-10\ldots-15^{\circ}\text{C}$). Устанавливается относительно теплая, но ветреная и снежная погода. Самая высокая средняя температура января (-6°C) наблюдается на севере полуострова Рыбачий, где особенно сильно проявляется отепляющее влияние Нордкапского течения. На побережье Кольского полуострова средне январская температура составляет $-7\ldots-10^{\circ}\text{C}$, почти такая же температура ($-8\ldots-10^{\circ}\text{C}$) на юге Карелии; во внутренних районах Кольского полуострова и на северо-западе Карелии она составляет $-12\ldots-13^{\circ}\text{C}$. С вторжением теплого воздуха бывают связаны оттепели (температура поднимается до 5°C), гололед, дожди. Температура воздуха часто колеблется около 0°C . Наибольшие похолодания вызывает вторжение в антициклонах воздуха из центральных районов Арктики. В таких случаях температура может понижаться до $-35\ldots-40^{\circ}\text{C}$. Абсолютный минимум в отдельных пунктах колеблется от -38 до -54°C .

Преобладание циклонической погоды зимой обуславливает высокую относительную влажность (около 80%), большую пасмурность и частые снегопады. Снежный покров лежит почти пять месяцев в году, а на севере иногда и дольше. Его мощность к концу зимы достигает 50-70 см. В горных районах снега скапливается еще больше (до 1 м и более). Вследствие неравномерного распределения снежной толщи на склонах гор образуются лавины. Сходит снег в Карелии к середине мая, а на севере Кольского полуострова лежит до конца мая — начала июня.

Летом на Кольском полуострове устанавливается полярный день, продолжающийся в Мурманске два месяца, а в Кандалакше — один. На севере Карелии (66° с. ш.) полярный день составляет всего одни сутки, но ночи в Карелии короткие, сумеречные, поэтому суммарная радиация достигает значительных величин. На Кольском полуострове за июнь-август она составляет 36-37,5 ккал/см². Однако частая облачность снижает инсоляцию. Лето на Кольском полуострове прохладное и дождливое. Усиливается циклоническая деятельность на арктическом фронте. Пути летних циклонов проходят несколько южнее, чем зимних. В тыл циклонов затекает холодный арктический воздух. На побережье Кольского полуострова преобладают северные ветры, но при значительном поступлении солнечной радиации арктический воздух довольно быстро прогревается, поэтому изотермы июля в северной части полуострова сближены. Средние температуры здесь составляют 8-12°C. Во внутренних районах они достигают 14-15°C. Относительная влажность воздуха летом меньше, чем зимой, но все же достаточно высока (65-70%). Много дождливых дней. Летом осадков выпадает больше, чем в другие сезоны. Изредка случаются вторжения тропического воздуха, при которых температура может достигать 25-35°C. Абсолютный максимум на Кольском полуострове 30- 33°C.

Годовая сумма осадков составляет 500-700 мм, в горах — до 1000 мм. Возможное испарение значительно ниже количества выпадающих осадков, поэтому увлажнение повсюду избыточное, что определяет большую обводненность территории.

По климатическому районированию Б. П. Алисова (1956 г) север Кольского полуострова относится к Атлантической области субарктического пояса. Вся остальная территория входит в Атлантико-Арктическую область умеренного пояса.

3.2. Анализ метеорологических факторов общего речного стока на территории Кольского полуострова

Информационной основой решения поставленных задач был массив данных, состоящий из: метеоданных (температуры, осадки) по станциям Кольского полуострова (ежегодные ежемесячные), данных по расходам на створах рек (ежегодные ежемесячные, суточные) (Табл.3.2.1, Табл.3.2.2). Эти створы и метеостанции включены в государственную наблюдательную сеть Росгидромета, и в базу мониторинга климата Института глобального климата и экологии РАН. Длина рядов: 1932(36/53) – 2015 гг.

Для сбора данных использовались следующие общедоступные электронные ресурсы: http://meteocenter.net/world_weather_stations.htm, <http://meteo.ru/>. и гидрологические ежегодники. Проведено сопоставление гидрометрических створов с метеорологическими станциями. Информация по изученности представлена на карте

фактического материала (рис. 2.1). Сделан статистический анализ данных на изучаемой территории Кольского полуострова.

.

Табл.3.2.1. Данные по сворам Кольского полуострова

№№ п/п	Название водного объекта и пункта наблюдений		Код пункта наблю- дений	Код водного объекта	Расстояние (км.) от		Площадь водос- бора, кв.км.	Период действия число,месяц,год		Отметка нуля поста		Координаты	
					истока	устья		открыт	закрыт	Высота, м	система высот	широта грмин.	долгота грмин.
1	1	р.Латсо-Юки- ГЭС	71001	101000001	14.0	133	14400	01.01.1956	Действ.	0.00	БС	68.57	28.38
3	2	р.Латсо-Юки- Борисоглебская ГЭС	71004	101000001	142	5.50	18300	12.09.1963	Действ.	0.00	БС	69.39	30.08
9	3	р.Колос-Юки- пгт Никель	71010	101000001	18.0	3.30	133	01.10.1967	Действ.	40.09	(БС77)	69.25	30.13
15	4	р.Печенга- ст.Печенга	71018	101000027	93.0	8.30	1680	19.09.1957	Действ.	13.54	(БС77)	69.31	31.10
36	5	р.Ура-с.Ура- Губа	71044	101000093	60.0	3.00	1020	12.12.1934	Действ.	1.45	(БС77)	69.16	32.48
50	6	р.Тулума-ГЭС Верхне- Тулумская	71060	101000112	1.00	63.0	17500	18.06.1934	Действ.	0.00	БС	68.36	31.45
51	7	р.Тулума-ГЭС Нижне-Тулумская	71066	101000112	64.0	0.00	21500	01.01.1937	Действ.	0.00	БС	68.50	32.49
52	8	р.Печенга-с.Падун	71067	101000113	78.0	1.00	1600	27.04.1930	Действ.	23.00	(БС)	68.34	31.43
53	9	р.Шовна-2 км от устья	71068	101000128	37.0	2.00	508	21.10.1951	Действ.	58.53	(БС77)	68.41	31.55
61	10	р.Бува-устье	71077	101000186	59.0	2.00	982	06.08.1968	Действ.	91.17	(БС77)	68.05	30.48
62	11	р.Ирвас-2.1 км от устья	71078	101000174	64.0	3.00	1740	03.08.1968	Действ.	89.07	(БС77)	68.00	30.15
69	12	р.Юкта- пор.Калюкоски	71085	101000204	109	61.0	2540	21.10.1959	Действ.	105.13	(БС77)	68.32	28.55
70	13	р.Юкта- пор.Люнакоски	71086	101000204	109	61.0	4530	01.07.1965	Действ.	75.05	(БС77)	68.32	28.55
73	14	р.Лаун-Юки-2.5 км от устья	71090	101000228	26.0	2.50	319	01.09.1967	Действ.	77.47	(БС77)	68.59	30.09
75	15	р.Акким-6 км от устья	71092	101000230	65.0	6.00	1400	02.07.1965	Действ.	80.86	(БС77)	68.43	30.20
79	16	р.Аннама-2 км от устья	71096	101000244	42.0	2.00	298	01.07.1965	Действ.	87.92	(БС77)	68.45	30.49
81	17	р.Кота-исток	71098	101000263	1.00	82.0	575	20.04.1934	Действ.	132.29	(БС77)	68.21	33.16
82	18	р.Кота-14.29-ый км Октябрьской жд.	71104	101000263	75.0	8.00	3780	18.10.1927	Действ.	23.53	(БС77)	68.50	33.05
87	19	р.Кита- ст.Югская	71109	101000274	85.0	2.20	1150	05.02.1932	Действ.	100.40	(БС77)	68.37	33.17
93	20	р.Роста-устье	71117	101000299	11.0	1.10	162	21.05.1979	Действ.	4.58	(БС)	69.02	33.05
102	21	р.Гериберка-60- ый км	71126	101000320	64.0	63.0	933	06.09.1967	Действ.	164.98	(БС77)	68.54	34.22
106	22	р.Воронья-исток	71131	101000336	3.00	152	3770	07.03.1935	Действ.	152.79	(БС77)	68.51	35.36
108	23	р.Воронья- Серебрянская ГЭС-1	71134	101000336	107	48.0	8640	11.08.1959	Действ.	0.00	БС	68.51	35.36

№№ п/п	Название водного объекта и пункта наблюдений		Код пункта наблю- дений	Код водного объекта	Расстояние (км.) от		Площадь водос- бора, кв.км.	Период действия число, месяц, год		Отметка нуля поста		Координаты	
					истока	устья		открыт	закрыт	Высота, м.	система высот	широта гр.мин.	долгота гр.мин.
109	24	р.Воронья- Серебрянская ГЭС-2	71136	101000336	130	26.0	9530	25.03.1970	Действ.	0.00	БС	68.59	35.43
111	25	р.Нивка-устье	71139	101000337	21.0	1.00	204	28.09.1939	Действ.	154.13	(БС77)	68.06	35.08
112	26	р.Чудынок-4км от устья	71140	101000348	47.8	3.20	1250	09.07.1975	Действ.	153.97	(БС77)	68.17	35.07
113	27	р.Лунь-устье	71141	101000353	18.0	0.70	155	29.07.1973	Действ.	157.00	(БС)	68.26	35.25
118	28	р.Туманная- пос.Туманный	71146	101000387	2.30	4.20	127	11.05.1963	Действ.	104.00	(БС)	68.53	35.41
124	29	р.Сергеевский-3км от устья	71153	101000417	29.0	3.00	205	10.09.1968	Действ.	155.50	(БС)	67.58	35.00
136	30	р.Лунь- с.Краснощелье	71165	101000565	136	290	3810	07.03.1940	Действ.	147.98	(БС)	67.21	37.02
139	31	р.Лунь- с.Каневка	71168	101000565	312	114	10200	20.08.1932	Действ.	124.81	(БС77)	67.08	39.40
156	32	р.Чаванга- с.Чаванга	71185	101000753	49.0	3.00	1180	28.07.1962	Действ.	19.67	(БС77)	66.08	37.45
157	33	р.Варзуга- с.Варзуга	71186	101000765	231	23.0	7940	07.03.1935	Действ.	8.71	(БС77)	66.24	36.38
164	34	р.Умба-исток	71193	101000862	0.50	1.23	2380	27.02.1932	Действ.	148.54	(БС77)	67.32	34.19
170	35	р.Умба- пос.Паялка	71199	101000862	119	3.70	6470	14.06.1930	Действ.	3.43	(БС77)	66.41	34.19
194	36	р.Нива-Нива ГЭС-1	71224	101000956	4.70	4.30	12300	13.05.1925	Действ.	0.00	БС	67.23	32.33
195	37	р.Нива-Нива ГЭС-3	71232	101000956	30.0	6.20	12800	01.01.1950	Действ.	0.00	БС	67.12	32.28
199	38	р.Полва-исток	71239	101000972	0.20	2.80	3080	05.03.1934	Действ.	134.92	(БС77)	67.37	31.31
200	39	р.Бна-пос.Бна	71241	101000976	7.20	5.50	1620	01.06.1933	Действ.	151.41	(БС77)	67.37	31.04
204	40	р.Ковдра- г.Ковдор	71245	101000984	17.0	19.0	110	01.10.1958	Действ.	209.10	(БС77)	67.33	30.31
215	41	р.Курунга- г.Оленегорск	71260	101001032	2.50	3.10	509	12.10.1933	Действ.	129.93	(БС77)	68.06	33.19
218	42	р.Польцовка- ст.Имандра	71267	101001042	12.0	1.50	898	08.09.1961	Действ.	130.09	(БС77)	67.50	33.14
219	43	р.МалаяБеляя- ст.Хибины	71268	101001043	12.0	1.50	799	14.06.1929	Действ.	154.32	(БС77)	67.41	33.15
224	44	р.Оксториок- г.Кировск	71277	101001049	7.90	1.80	33.3	27.09.1968	Действ.	316.76	(БС)	67.38	33.42
229	45	р.Ирента- регулирующее сооружение	71284	101000971	5.10	3.40	4260	01.01.1938	Действ.	0.00	БС	67.39	31.46
233	46	р.Нюта-устье	71288	101000154	10.9	1.30	3400	01.01.1980	Действ.	76.87	(БС77)	68.09	30.13

Табл. 3.2.2. Сопоставление проанализированных створов с метеостанциями

Створ	№	Годы наблюдений	Метеостанция	№
р.Печенга - ст.Печенга	4	С 1957, кроме 1996	Перевал, Падун	14,15
р.Ура - с.Ура-Губа	5	С 1934, кроме 1936, 1996	Ура-Губа	27
р.Печа - с.Падун	8	С 1930, кроме 1996		
р.Гирвас - 2.1 км от устья	11	С 1968, кроме 1996		
р.Лотта - пор.Каллокоски	12	С 1959, кроме 1996	Верховье Лотты	8
р.Лотта - пор.Ловнакоски	13	С 1965, кроме 1996	Верховье Лотты, Ниванкюль	8, 16
р.Акким - 6 км от устья	15	С 1981, кроме 1996	Ниванкюль	16
р.Кола - 1429-ый км Октябрьской ж.д.	18	С 1927, кроме 1996		
р.Кица - ст.Лопарская	19	С 1947, кроме 1996		
р.Поной - с.Краснощелье	30	С 1940, кроме 1996	Краснощелье	22
р.Поной - с.Каневка	31	С 1933, кроме 1938-1943	Каневка	7
р.Чаваньга - с.Чаваньга	32	С 1962, кроме 1996	Чаваньга	20
р.Варзуга - с.Варзуга	33	С 1935, кроме 1996	Кашкаранцы	19
р.Умба - исток	34	С 1932, кроме 1989,1996	Апатиты	25
р.Умба - пор.Паялка	35	С 1930, кроме 1996	Умба	9
р.Толва - исток	38	С 1934, кроме 1941-1962,1996	Ковдор	3
р.Ена - пос.Ена	39	С 1933, кроме 1939,1996	Ковдор	3
р.Нота - устье	46	С 1980, кроме 1996, 2001-2005		



Рис.3.2.1. Карта Кольского полуострова с изучаемыми створами (синим) и метеостанциями (красным)

3.3. Анализ статистических характеристик

Изменения климата оцениваются как разности климатических переменных, характеризующих сравниваемые периоды времени, и как тенденции изменений климатических переменных внутри одного периода. Обнаруженные изменения климата оцениваются как реальные (соответствующие действительности), если их величина превосходит рассчитанную ошибку величины изменений (дисперсия, среднеквадратичное отклонение).

Проанализированы изменения (ежегодные, ежемесячные) температуры приземного воздуха и осадков по 8 метеостанциям на территории Кольского полуострова (Ковдор, Краснощелье, Умба, Териберка, Мурманск, Кандалакша, Каневка, Янискоски). Так же проведен статистический анализ среднемесячных и среднегодовых изменений расхода на 22 створах. Были рассчитаны следующие статистические характеристики:

- угловой коэффициент линейного тренда (a);
- вклад тренда в общую дисперсию процесса (достоверность тренда первого порядка, R). Сравниваются фактические значения y и значения, получаемые из уравнения прямой; по результатам сравнения вычисляется коэффициент детерминированности, нормированный от 0 до 1. Если он равен 1, то имеет место полная корреляция с моделью, т. е. нет различия между фактическим и оценочным значениями y . В противоположном случае уравнение регрессии неудачно.

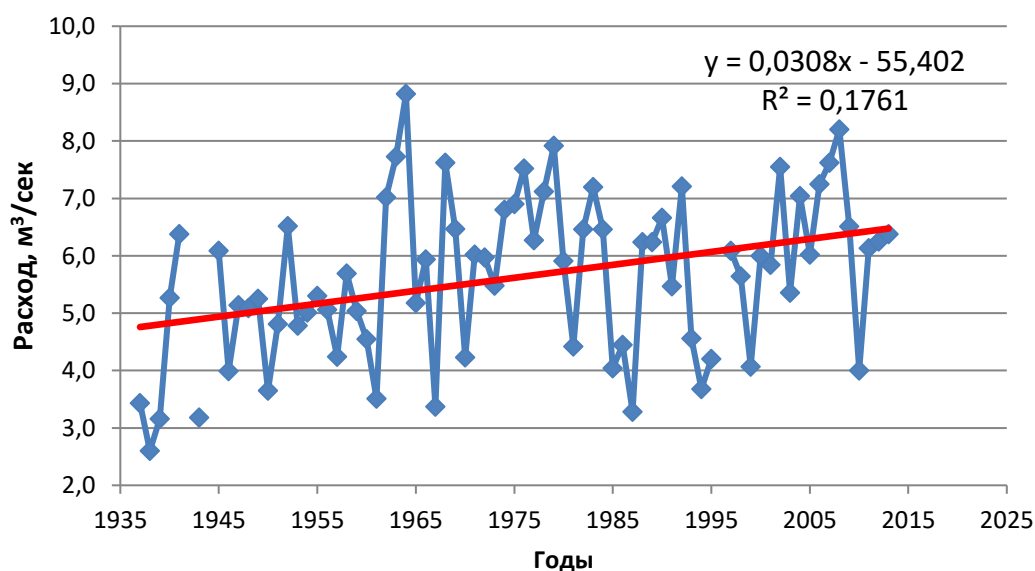


Рис.3.3.1 Изменения среднего расхода воды в январе месяца на створе р Ура- Губа

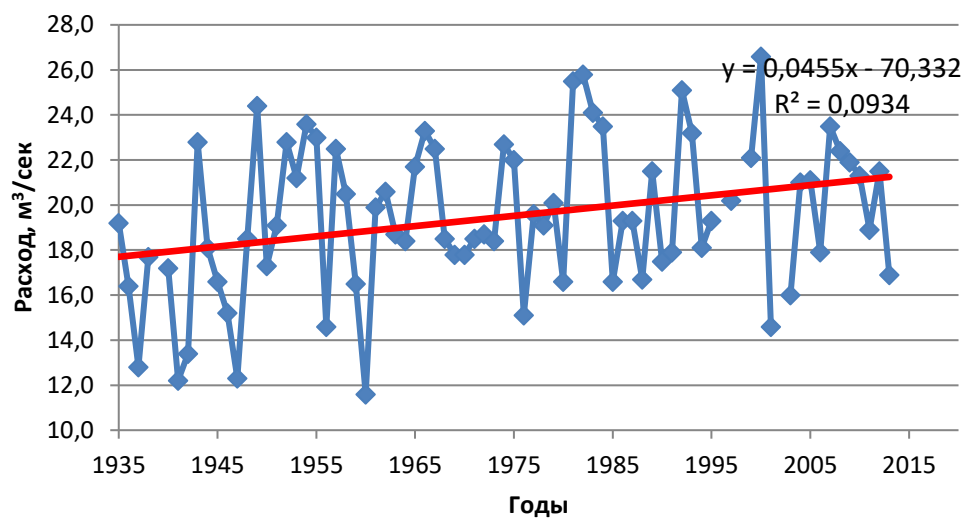


Рис. 3.3.2 Изменения среднегодового расхода воды на створе р Ена- пос. Ена

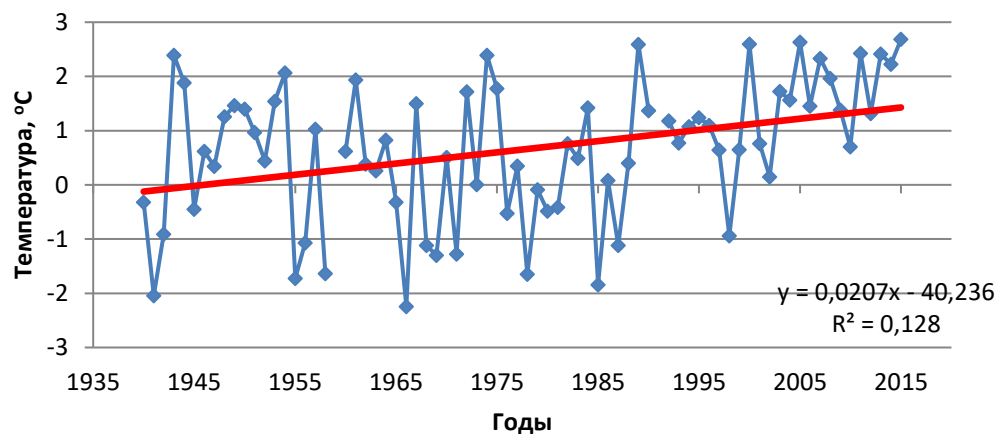


Рис. 3.3.3 Изменения среднегодовых температур на метеостанции Умба

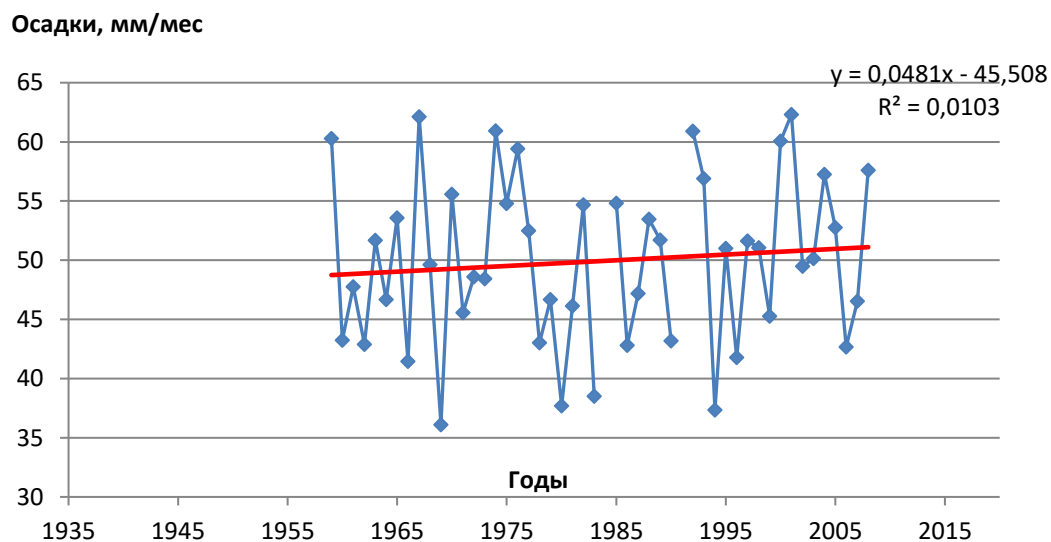


Рис. 3.3.4 Изменения среднегодовых осадков на метеостанции Ковдор

Для всех створов, на которых возможно провести расчет, наблюдается тенденция увеличения стока, особенно в зимние месяцы. Вклад тренда в общую дисперсию процесса в зимний период изменяется в диапазоне 0,05 – 0,28, так же на всех створах, кроме р.Гривас-21 км от устья, наблюдается тенденция ускорения процесса. Температуры, по всем метеостанциям увеличиваются, а осадки представляют собой «белый шум». Стоит отметить, что наблюдения и измерения расходов на створах и температур на метеостанциях начались значительно раньше, чем измерения осадков. Из-за этого продолжительность анализируемого ряда осадков меньше, что гарантирует меньшую достоверность при статистическом анализе (рис. 3.3.1. – 3.3.4, табл. 3.3.1 -3.3.4).

Построена карта достоверности трендов первого порядка для среднегодового стока Кольского полуострова, в пределах площадей водосбора, рассматриваемых створов (рис. 3.3.5).



Рис. 3.3.5 Карта достоверности трендов первого порядка для среднегодового подземного стока Кольского полуострова

Табл. 3.3.1. Результаты статистической оценки по створам

Створ	Месяц/ Статистика	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Ежегодные значения
р.Печенга - ст.Печенга	а	0,03	0,01	0,02	0,07	0,38	-0,57	0,05	0,05	-0,11	0,62	0,03	0,06	0,22
	R ²	0,10	0,04	0,07	0,03	0,05	0,09	0,005	0,003	0,02	0,007	0,005	0,11	0,01
р.Ура - с.Ура- Губа	а	0,03	0,02	0,02	0,02	0,24	-0,13	0,06	0,04	0,04	0,08	0,06	0,03	0,08
	R ²	0,18	0,09	0,11	0,02	0,09	0,03	0,04	0,02	0,02	0,10	0,07	0,09	0,17
р.Печа - с.Падун	а	0,03	0,02	-0,05	0,07	0,34	-0,12	0,05	0,03	0,01	0,06	0,08	0,04	0,05
	R ²	0,28	0,28	0,0007	0,08	0,13	0,02	0,009	0,004	0,0006	0,02	0,09	0,18	0,08
р.Гирвас - 2.1 км от устья	а	-0,07	-0,03	-11,93	0,13	-0,05	-5,04	0,17	-0,02	-0,12	-0,31	-0,13	0,90	0,55
	R ²	0,09	0,03	0,08	0,10	0,001	0,13	0,02	0,0007	0,02	0,28	0,10	0,04	0,43
р.Лотта - пор.Каллокоски	а	0,04	0,02	0,03	0,09	0,54	-0,27	0,04	-0,01	-0,12	0,11	0,04	0,05	0,49
	R ²	0,07	0,04	0,08	0,07	0,09	0,02	0,002	0,0001	0,009	0,02	0,003	0,03	0,05
р.Лотта - пор.Ловнакоски	а	0,04	0,04	0,02	0,13	0,65	-0,69	0,13	0,08	-0,12	0,09	0,06	0,02	0,82
	R ²	0,04	0,04	0,01	0,05	0,04	0,04	0,006	0,002	0,004	0,007	0,002	0,001	0,01
р.Акким - 6 км от устья	а	-3,64	0,03	0,02	-1,14	-0,19	-0,52	-0,17	-0,02	-0,15	0,04	0,10	0,07	-0,06
	R ²	0,07	0,05	0,03	0,009	0,02	0,11	0,02	0,0009	0,03	0,006	0,06	0,08	0,02
р.Кола - 1429- ый км Октябрьской ж.д.	а	0,08	0,05	0,05	0,10	0,87	-0,07	0,27	0,20	0,10	0,22	0,18	0,11	0,61
	R ²	0,24	0,15	0,20	0,03	0,10	0,0002	0,06	0,06	0,01	0,09	0,10	0,25	0,05

Створ	Месяц/ Статистика	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Ежегодные значения
р.Поной - с.Краснощелье	а	0,03	-0,07	0,02	0,15	0,79	-0,18	0,12	0,05	-0,07	0,01	0,14	0,07	0,09
	R ²	0,05	0,01	0,05	0,0014	0,10	0,007	0,02	0,004	0,008	0,00002	0,04	0,07	0,05
р.Поной - с.Каневка	а	0,22	0,18	0,15	0,24	2,20	-0,53	0,19	0,33	0,003	0,38	0,42	0,34	0,98
	R ²	0,22	0,31	0,38	0,05	0,11	0,009	0,007	0,02	0,000006	0,03	0,06	0,17	0,04
р.Чаваньга - с.Чаваньга	а	0,04	0,01	0,002	0,06	0,2	-1,09	-0,07	0,03	-0,006	0,09	0,17	0,13	0,001
	R ²	0,05	0,01	0,0007	0,08	0,02	0,09	0,03	0,004	0,0003	0,03	0,1	0,18	0,00002
р.Варзуга - с.Варзуга	а	0,12	0,12	0,10	0,22	1,35	-0,54	0,38	0,31	0,10	0,43	0,41	0,27	0,98
	R ²	0,12	0,23	0,19	0,02	0,06	0,02	0,05	0,04	0,003	0,04	0,06	0,14	0,06
р.Умба - исток	а	0,09	-0,01	0,08	0,06	0,07	0,07	-0,05	-0,05	-0,07	0,008	0,03	0,05	0,09
	R ²	0,15	0,0006	0,28	0,18	0,03	0,007	0,004	0,005	0,02	0,0003	0,005	0,03	0,02
р.Умба - пор.Паялка	а	0,11	0,11	0,09	0,17	0,75	-0,07	-0,11	-0,06	0,22	0,12	0,17	0,20	0,14
	R ²	0,06	0,09	0,10	0,14	0,10	0,001	0,006	0,0024	0,005	0,009	0,03	0,10	0,04
р.Толва - исток	а	0,05	0,03	0,02	0,04	0,38	-0,78	-0,10	-0,11	-0,12	-0,03	-0,04	-0,008	-0,005
	R ²	0,05	0,02	0,03	0,08	0,12	0,12	0,02	0,03	0,05	0,004	0,01	0,001	0,0003
р.Ена - пос.Ена	а	0,04	0,03	-0,73	0,04	0,19	0,007	0,08	0,03	0,01	0,04	0,01	-0,13	0,05
	R ²	0,19	0,18	0,03	0,11	0,09	0,0001	0,05	0,007	0,001	0,03	0,005	0,03	0,09
р.Монча	а	0,06	0,04	0,04	0,05	0,45	0,10	0,07	0,12	0,07	0,54	0,12	0,09	0,11
	R ²	0,22	0,21	0,28	0,31	0,23	0,002	0,01	0,07	0,04	0,02	0,21	0,22	0,25

Табл. 3.3.2. Результаты статистической оценки по метеостанциям

Метеостанция	Параметры	Месяц/Статистика	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Ежегодные значения
Ковдор	Температуры	a	0,06	0,06	0,06	0,06	0,03	0,01	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04	0,08	0,04
		R ²	0,08	0,06	0,1	0,19	0,05	0,01	0,009	0,04	0,16	0,06	0,05	0,11	0,35
	Осадки	a	0,18	0,07	0,08	-0,04	0,29	0,30	0,23	-0,08	-0,37	-0,16	-0,14	0,21	0,05
		R ²	0,03	0,005	0,008	0,002	0,06	0,02	0,006	0,002	0,04	0,008	0,01	0,04	0,01
Краснощелье	Температуры	a	0,007	0,02	0,06	0,03	0,03	0,01	0,007	-0,006	0,01	0,02	-0,006	0,01	0,02
		R ²	0,002	0,006	0,13	0,08	0,11	0,02	0,004	0,005	0,03	0,03	0,002	0,005	0,08
	Осадки	a	0,13	0,06	-0,07	-0,06	0,33	0,31	0,18	-0,04	-0,33	0,06	-0,19	0,18	0,07
		R ²	0,02	0,006	0,007	0,004	0,08	0,03	0,006	0,0004	0,04	0,001	0,03	0,03	0,03
Умба	Температуры	a	0,02	0,03	0,07	0,03	0,03	0,02	0,01	0,001	0,01	0,01	0,0006	0,01	0,02
		R ²	0,02	0,02	0,18	0,11	0,13	0,06	0,02	0,0005	0,05	0,02	0,00003	0,005	0,13
	Осадки	a	0,63	0,36	0,09	0,18	0,25	-0,10	0,62	-0,53	-0,27	-0,04	0,20	0,45	0,15
		R ²	0,31	0,15	0,01	0,06	0,04	0,004	0,09	0,07	0,02	0,0004	0,02	0,16	0,12
Териберка	Температуры	a	0,007	0,01	0,03	0,02	0,02	0,003	0,008	-0,006	0,02	0,01	-0,01	0,01	0,01
		R ²	0,006	0,009	0,09	0,05	0,08	0,002	0,008	0,008	0,07	0,02	0,01	0,009	0,05
	Осадки	a	-0,43	-0,26	0,18	0,04	0,20	-0,40	-0,56	0,04	-0,07	0,28	-0,50	-0,16	-0,14
		R ²	0,10	0,07	0,02	0,002	0,01	0,02	0,03	0,0004	0,002	0,01	0,08	0,01	0,06
Мурманск	Температуры	a	0,006	0,02	0,04	0,02	0,02	0,002	0,007	-0,003	0,02	0,01	-0,02	0,001	0,01
		R ²	0,002	0,01	0,1	0,06	0,1	0,0004	0,008	0,002	0,06	0,01	0,02	0,00005	0,04
	Осадки	a	0,04	-0,08	0,30	0,25	0,34	-0,002	0,40	-0,04	-0,21	0,38	-0,16	0,09	0,11
		R ²	0,003	0,02	0,17	0,12	0,10	0,0000007	0,04	0,0003	0,02	0,06	0,02	0,008	0,06
Метеостанция	Параметры	Месяц/Статистика	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Ежегодные значения

Канда лакша	Темпе рату ры	a	-0,009	0,005	0,04	0,02	0,02	0,008	0,002	-0,01	0,002	-0,001	-0,03	-0,02	0,002
		R ²	0,004	0,0008	0,08	0,04	0,08	0,01	0,0007	0,03	0,0008	0,0002	0,06	0,009	0,001
	Осад ки	a	0,20	0,20	-0,08	0,005	0,39	0,22	0,57	0,04	-0,13	-0,05	0,05	0,24	0,14
		R ²	0,03	0,04	0,008	0,00004	0,07	0,02	0,08	0,0009	0,005	0,001	0,002	0,05	0,09
Каневка	Темпе рату ры	a	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,02	-0,002	0,001	0,03	0,04	0,009	0,04	0,03
		R ²	0,03	0,02	0,04	0,07	0,04	0,02	0,0002	0,0001	0,09	0,06	0,002	0,02	0,12
	Осад ки	a	0,006	0,03	-0,02	-0,003	0,39	-0,03	0,13	0,59	-0,20	-0,11	0,06	0,1	0,08
		R ²	0,00009	0,002	0,001	0,00002	0,13	0,0004	0,005	0,09	0,02	0,007	0,006	0,01	0,04
Яниско ски	Темпе рату ры	a	0,02	0,02	0,01	0,04	0,02	0,004	0,005	0,01	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02
		R ²	0,01	0,003	0,003	0,1	0,03	0,001	0,002	0,03	0,08	0,06	0,008	0,01	0,07
	Осад ки	a	0,02	-0,07	0,11	0,10	0,55	0,33	0,02	-0,01	-0,32	0,34	-0,19	-0,009	0,08
		R ²	0,0002	0,006	0,02	0,007	0,15	0,02	0,00006	0,00004	0,04	0,04	0,02	0,0001	0,04

Для анализа тенденций в изменении многолетних рядов расходов, осадков и температур, на втором этапе были выбраны створы и станции, с достоверными и репрезентативными данными максимальной длины и находящиеся в непосредственной близости друг от друга. Расчет проводился интервально (для каждого 20 лет), так как установление коррелятивных связей аналитическим методом допускается при длительности параллельных наблюдений за изучаемыми явлениями не менее 15 лет.

Для расчета и анализа статистических оценок, описывающих многолетние изменения климатических переменных, определяющих питание подземных вод, помимо углового коэффициента линейного тренда и вклада тренда в общую дисперсию процесса, был произведен анализ трендов второго порядка, которые показывают ускорение или замедление процесса и рассчитаны следующие статистические характеристики для каждого периода:

- коэффициент тренда второго порядка (a_2 - °C/год²);
- стандартные ошибки всех параметров уравнений. Стандартная ошибка регрессии (стандартная ошибка оценки) рассматривается в качестве меры разброса данных наблюдений от смоделированных значений. Стандартная ошибка регрессии рассчитывается как квадратный корень из несмещенной оценки дисперсии регрессии:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\hat{\sigma}^2} = \sqrt{\frac{1}{(n-2)} \left[\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 - \frac{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \right]}, \quad (3.3.1)$$

где n – общее число наблюдений, y_i – значения наблюдаемой переменной, x_i – значения объясняющей переменной, $\bar{y}$ – среднее значение наблюдаемой переменной по выборке, $\bar{x}$ – среднее значение объясняющей переменной по выборке, $\hat{\sigma}^2$ – несмещенная оценка дисперсии регрессии. Чем меньше значение стандартной ошибки регрессии, тем качество модели выше;

- число степеней свободы (df). Степени свободы полезны для нахождения F-критических значений. Для определения уровня надежности модели нужно сравнить полученные критические значения с наблюдаемыми;
- регрессионная (ssreg) и остаточная (ssresid) сумма квадратов;
- среднеквадратическое отклонение (σ) - мера того, насколько широко разбросаны точки данных относительно их среднего;
- дисперсия (D), мера рассеивания (отклонения от среднего). Дисперсия – отклонение наблюдаемого значения (для каждого наблюдения) от среднего арифметического. Выборочная дисперсия вычисляется по следующей формуле:

$$\delta^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2, \quad (3.3.2)$$

Где $\bar{X}$ – выборочное среднее, n – размер выборки. Если размер выборки относительно ограничен, то для более точного расчета применяется формула несмещенной (исправленной) дисперсии:

$$\delta^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (3.3.3)$$

где $\bar{X}$ – выборочное среднее, x_i – элемент выборки; n – размер выборки;

- наблюдательная статистика F-распределения, $F_{0,99}$, $F_{0,95}$ критические значения F-распределения для уровня значимости 0,99 и 0,95 соответственно. Используется для определения того, является ли наблюдаемая взаимосвязь между зависимой и независимой переменной случайной или нет;
- наблюдательная статистика обратного распределения Стьюдента $T_{0,99}$, $T_{0,95}$ критические значения T-распределения для уровня значимости 0,99 и 0,95 соответственно;
- коэффициент корреляции (K). Используется при изучении подземного стока для установления и оценке связи между различными процессами и явлениями (гидрогеологическими, гидрологическими, метеорологическими и др.). Эта связь носит обычно коррелятивный характер. Это значит, что при одном и том же значении одной переменной величины вторая может принимать не одно, а несколько значений. Объясняется это тем, что гидрологические и гидрогеологические характеристики зависят одновременно от многих природных факторов. Так, например, инфильтрационное питание связано с атмосферными осадками, испарением и величинами поверхностного стока. Максимальные уровни воды в реках в период весеннего половодья зависят одновременно от запасов воды в снеге в момент снеготаяния, температуры воздуха в период снеготаяния и других факторов.

В качестве меры интенсивности климатических изменений за указанный интервал времени используются коэффициенты линейного тренда и тренда 2-го порядка, характеризующие среднюю скорость и ускорение изменений климатической переменной.

В качестве меры существенности тренда оценивается доля дисперсии климатической переменной, объясняемая трендом, выраженная в процентах от полной

дисперсии изменения климатической переменной за рассматриваемый интервал времени (достоверность тренда).

Для оценки степени не случайности определения достоверности тренда рассчитаны 99%-ный и 95%-ный уровни значимости, определяемые по распределению Фишера.

Для оценки статистической значимости (полезности) коэффициентов тренда используется 99%-ный и 95%-ный уровни значимости, определяемые по обратному распределению Стьюдента.

Исследование коррелятивных связей сводится к установлению наличия связей, определению формы и оценке тесноты связи между изучаемыми процессами. Форма связи может быть прямолинейной и криволинейной, устанавливается при помощи графических и аналитических методов.

Графические методы отличаются простотой; дают наглядное представление о форме связей и поэтому особенно широко используются в гидрологии. Однако точность их невелика, поскольку проведение линий связи по точкам неизбежно вносит известный субъективизм в построение связей.

Аналитические методы сводятся к вычислению уравнений связи между изучаемыми явлениями и процессами, по которым можно в случае необходимости построить графики связи. Установление коррелятивных связей аналитическим методом допускается при длительности параллельных наблюдений за изучаемыми явлениями не менее 10—15 лет.

Для оценки тесноты связи и служит коэффициент корреляции. По величине он может изменяться от 0 до ± 1 . Чем больше абсолютное значение коэффициента корреляции, тем теснее связь между изучаемыми явлениями. Если коэффициенты корреляции равны или близки к нулю, то это свидетельствуют об отсутствии связи между явлениями, а если равны или близки ± 1 , — о наличии очень тесной связи между ними. Положительное значение коэффициента указывает на наличие прямой связи между коррелируемыми явлениями, при которой с увеличением одной величины увеличивается и вторая (с ростом количества атмосферных осадков увеличивается сток); отрицательное значение коэффициента корреляции свидетельствует об обратной связи, при которой с увеличением одной величины вторая величина уменьшается (с ростом испарения сток уменьшается).

Принято считать, что при значении коэффициента корреляции не менее $\pm 0,75$ использование коррелятивной связи для расчетов и прогнозов вполне допустимо. При более низких значениях этого коэффициента использование связей может повлечь за собой значительные ошибки.

Для суждения о надежности полученного коэффициента корреляции вычисляется его вероятная ошибка; чем она меньше, тем надежнее значение коэффициента.

Одновременно с коэффициентом корреляции вычисляются уравнения регрессии, которые характеризуют форму связи между коррелируемыми величинами.

В ряде случаев возникает необходимость в анализе связей между несколькими переменными величинами. Эта задача решается множественной корреляцией.

При исследовании коррелятивных связей необходимо ясно представлять природу той или иной предполагаемой зависимости. Установление связей, физический смысл которых не совсем ясен, всегда ненадежно.

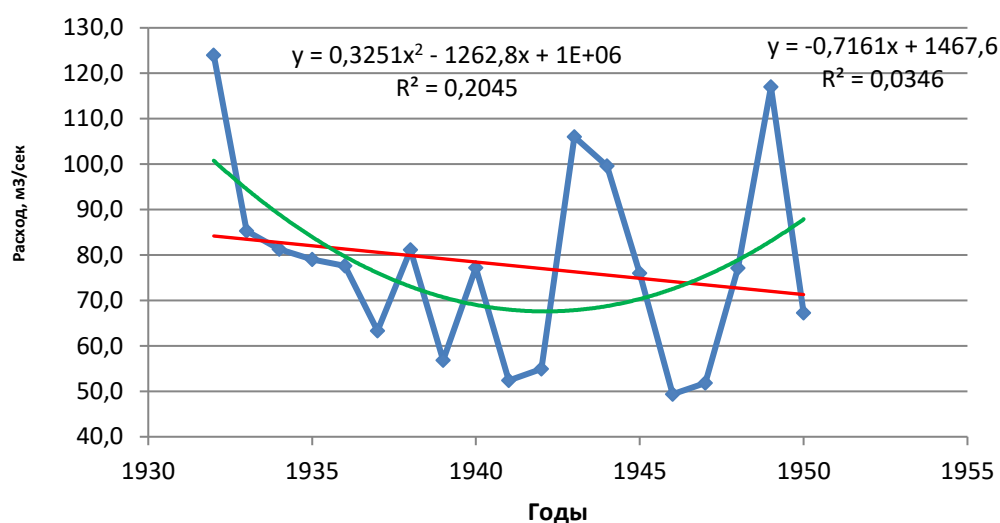


Рис.3.3.6 Изменение среднегодовых расходов на створе р. Умба-п. Паялка за период наблюдений с 1932 г по 1950 г

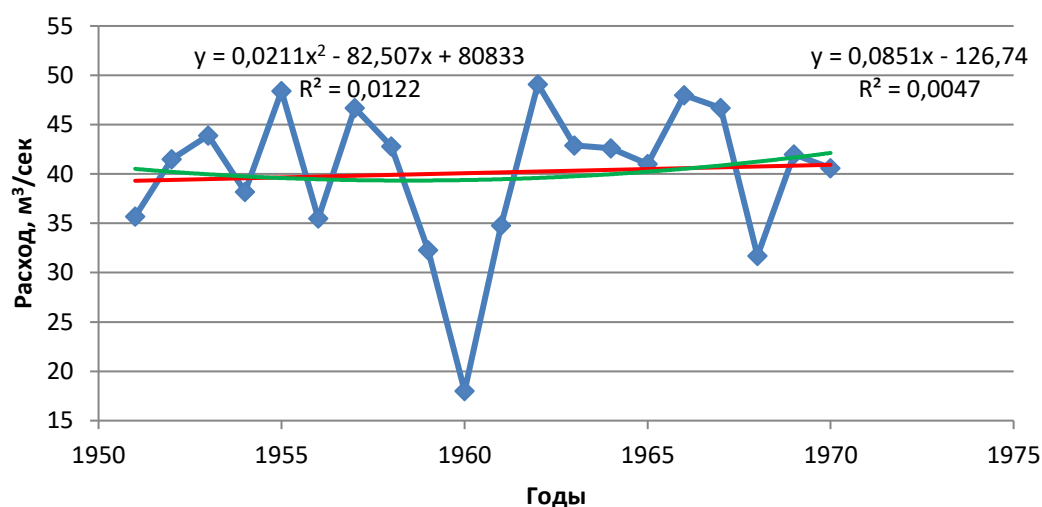


Рис.3.3.7 Изменение среднегодовых расходов на створе р. Поной - с. Краснощелье за период наблюдений с 1951 г по 1970 г

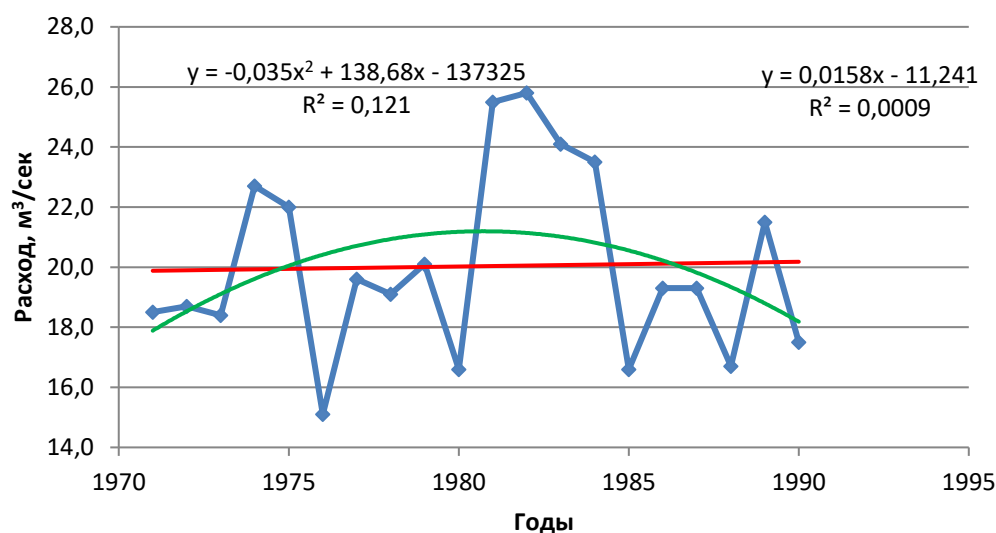


Рис. 3.3.8 Изменение среднегодовых расходов на створе р. Ена - пос. Ена за период наблюдений с 1971 г по 1990 г

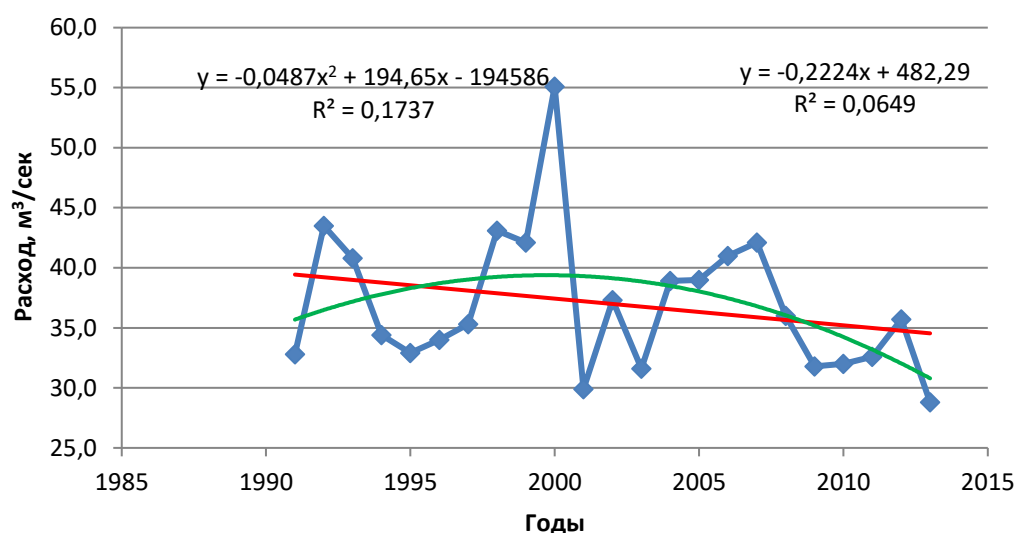


Рис. 3.3.9 Изменение среднегодовых расходов на створе р. Толва - исток за период наблюдений с 1991 г по 2015 г

Для всех рассматриваемых створов наблюдается тенденция снижения стока в интервалах с 1932 -1950 гг, 1991 – 2015 гг и тенденция увеличения стока 1951 – 1970 гг, 1971 -1991 гг. Это сопоставимо с периодами потепления и похолодания в изучаемом регионе. Стоит отметить, что для всех интервалов времени, кроме 1951 -1970 гг. наблюдается отрицательная динамика тренда второго порядка, что свидетельствует о замедлении (затухании) процесса изменения. Вклад тренда в общую дисперсию процесса для отрицательно направленных трендов второго порядка изменяется в диапазоне 0,01 –

0,21, для положительно направленных – 0,01 – 0,20. Значения коэффициента корреляции не превышают $\pm 0,30$, следовательно, использование коррелятивной связи для расчетов и прогнозов может повлечь за собой значительные ошибки. (рис.2.7. – 2.10., табл. 2.5.).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для изучаемой территории наблюдаются статистически – значимые положительные, реже отрицательные линейные тренды. Многолетние изменения межгодовых температур приземного воздуха стационарны. Они могут быть описаны как Марковская цепь (Винеровский процесс первого порядка). Марковский процесс – это разновидность стохастического процесса, в котором будущее значение переменной зависит только от ее предыдущего значения. Способы математических описаний таких случайных стохастических процессов в системе с дискретными состояниями зависят от того, в какие моменты времени (заранее известные или случайные) могут происходить переходы системы из состояния в состояние. Переход возможен в любой случайный момент времени - случайный Марковский процесс с непрерывным временем.

Так же получены значимые тренды второго порядка, которые характеризуют величину замедления, реже ускорения процесса в многолетнем ходе.

Статистический анализ многолетних изменений атмосферных осадков в рассматриваемых регионах показал – отсутствие статистически значимых трендов первого и второго порядка. Многолетние изменения в этом регионе за указанный интервал времени (1936 – 2015 гг.) могут быть описаны случайным процессом с характерной дисперсией.

Табл. 3.3.2 Расчет статистических характеристик для выбранных створов и метеостанций

Створ- Станиц я/ Статис тики	a	b	Se _a	Se _b	se _y	R ²	df	SS _{reg}	SS _{resid}	σ	D	F	F ₀₉₉	F ₀₉₅	T	T ₀₉₉	T ₀₉₅	ξ	ψ	a ₂	R ₂ ²	K
До 1950 г																						
Понной - Красно селье	0,54	-1001,29	1,18	2286,30	12,33	0,02	9	31,54	1367,92	11,83	127,20	0,21	10,56	5,12	0,46	3,25	2,26	+	+	-0,17	0,04	0,15
Понной - Каневка																						
Умса - Пялка	-0,72	1467,60	0,92	1779,94	21,89	0,03	17	292,26	8148,53	20,04	376,61	0,61	8,40	4,45	-0,78	2,90	2,11	+	+	0,33	0,20	0,17
Ена - Ковдор	0,15	-271,86	0,19	366,28	3,48	0,04	14	7,52	169,24	3,43	11,05	0,62	8,29	4,60	0,79	2,98	2,14	+	+	0,04	0,11	0,09
Толва - Ковдор																						
1951-1970 г																						
Понной - Красно селье	0,09	-126,74	0,29	574,84	7,56	0,01	18	4,82	1029,07	7,38	51,69	0,09	8,29	4,41	0,29	2,88	2,10	+	+	0,02	0,01	0,17
Понной - Каневка	0,28	-440,35	0,80	1572,61	20,69	0,01	18	52,01	7701,88	20,20	387,69	0,12	8,29	4,41	0,35	2,88	2,10	+	+	-0,04	0,01	0,20
Умса - Пялка	0,19	-298,69	0,55	1080,51	14,21	0,01	18	24,85	3635,95	13,88	183,04	0,12	8,29	4,41	0,35	2,88	2,10	+	+	0,05	0,02	0,22
Ена - Ковдор	-0,09	188,36	0,12	188,36	3,17	0,03	18	4,92	180,72	3,13	9,28	0,49	8,29	4,41	-0,70	2,88	2,10	+	+	0,02	0,05	0,17
Толва - Ковдор																						
1971-1990 г																						
Понной - Красно селье	-0,13	299,39	0,31	604,62	7,87	0,01	18	11,32	1115,59	7,70	56,35	0,18	8,29	4,41	-0,42	2,88	2,10	+	+	-0,06	0,06	0,01
Понной - Каневка	-0,17	456,80	0,76	1507,43	19,63	0,01	18	20,19	6934,46	19,13	347,73	0,05	8,29	4,41	-0,23	2,88	2,10	+	+	-0,06	0,01	0,10
Умса - Пялка	-0,02	119,31	0,47	929,36	12,10	0,00	18	0,24	2635,77	11,78	131,80	0,002	8,29	4,41	-0,04	2,88	2,10	+	+	-0,08	0,04	-0,09
Ена - Ковдор	-0,02	-11,24	0,12	242,21	3,15	0,00	18	0,17	179,04	3,07	8,96	0,02	8,29	4,41	0,13	2,88	2,10	+	+	-0,04	0,12	0,19
Толва - Ковдор	-0,13	301,67	0,22	444,18	5,78	0,02	18	11,82	602,07	5,68	30,69	0,35	8,29	4,41	-0,59	2,88	2,10	+	+	-0,08	0,21	0,29
После 1991 г																						
Понной - Красно селье	-0,07	181,51	0,24	479,32	7,62	0,00	21	4,65	1218,19	7,46	53,17	0,08	8,02	4,32	-0,28	2,83	2,08	+	+	-0,03	0,02	-0,05
Понной - Каневка	-0,55	1234,89	0,52	1042,64	16,57	0,05	21	309,42	5764,19	166,66	26567,00	1,13	8,02	4,32	-1,06	2,83	2,08	+	+	-1,01	0,07	-0,05
Умса - Пялка	-0,05	193,88	0,49	977,68	15,54	0,00	21	3,05	5068,27	15,18	220,49	0,01	8,02	4,32	-0,11	2,83	2,08	+	+	-0,03	0,008	0,04
Ена - Ковдор	-0,03	79,81	0,11	215,36	3,42	0,00	21	0,90	245,93	3,35	10,73	0,08	8,02	4,32	-0,28	2,83	2,08	+	+	0,009	0,02	0,22
Толва - Ковдор	-0,22	482,29	0,18	368,79	5,86	0,06	21	50,07	721,16	5,92	33,53	1,45	8,02	4,32	-1,21	2,83	2,08	+	+	-0,05	0,17	0,11

3.4. *Тенденции в изменении многолетних рядов*

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для изучаемой территории наблюдаются статистически – значимые положительные, реже отрицательные линейные тренды. Многолетние изменения межгодовых температур приземного воздуха стационарны. Они могут быть описаны как Марковская цепь (Винеровский процесс первого порядка). Процесс уменьшения подземного стока совпадает с периодами увеличения температуры в регионе. Процесс потепления носит неравномерный характер: потепление 1920-1930-х гг. сменилось похолоданием 1960-1970-х гг., а современное потепление началось примерно со второй половины 1980-х гг. Последнее потепление проявляется как в изменениях среднегодовой температуры, так и средне сезонных температур. При этом если современные летние температуры практически не превосходят температуры предыдущего потепления (1920-1930-х гг.), то среднегодовые являются наиболее высокими за весь период наблюдений.

Так же получены значимые тренды второго порядка, которые характеризуют величину замедления, реже ускорения процесса в многолетнем ходе.

На всей территории области, включая горные районы, наблюдается значительное подобие картин межгодовых вариаций температуры воздуха, атмосферных осадков и подземного стока, что указывает на единый механизм наблюдаемых изменений.

Существенных изменений количества осадков, за последние 50 лет, на равнинной территории нет. В вековом ходе наблюдается небольшая положительная тенденция к увеличению среднегодового количества осадков. Диапазон изменений сумм осадков в горных районах более широкий за счет вариаций орографической составляющей, возникающих вследствие изменений макроциркуляционных условий. Статистический анализ многолетних изменений атмосферных осадков в рассматриваемых регионах показал – отсутствие статистически значимых трендов первого и второго порядка. Многолетние изменения в этом регионе за указанный интервал времени (1932 – 2015 гг.) могут быть описаны случайным процессом с характерной дисперсией.

Устойчивых тенденций к усилению засушливости или повышению увлажнения региона не отмечается.

3.5. *Расчет подземного стока на отдельных водозаборах и практическая его оценка*

Формирование подземного стока в реки и количественная характеристика этого процесса представляют собой научный и прикладной интерес. Изучение подземного стока способствует уточнению процессов круговорота воды в природе, определению продолжительности циклов круговорота, темпов водообмена в верхних частях земной коры,

выяснению условий питания и разгрузки водоносных горизонтов. Исследование процессов подземного стока представляет интерес при решении гидрогеологических, гидрологических, геофизических, геохимических и геологических задач, например, для количественной оценки миграции химических элементов, в образовании и разрушении месторождений полезных ископаемых, в переносе тепла и формировании, геотермического режима земной коры.

Например, более глубокое понимание физических и химических взаимодействий верхних частей земной коры, гидросферы и атмосферы во многом зависит от степени раскрытия закономерностей формирования подземного стока и точности его количественной оценки.

Для анализа использовались суточные данные по расходам на створах незарегулированных рек (это исключает неоднородность гидрологических рядов за счет антропогенного воздействия), находящихся вблизи метеостанций (до 200 км, помогает оценить климатическую составляющую), с площадью водосборного бассейна более 5 тыс. км² (размер бассейна определяет водоносность – величину расхода, на бассейны меньшей площади будут сильно влиять локальные факторы, поэтому 5 тыс. км² – оптимальная величина водосборного бассейна для определения параметров стока, характерных для конкретных природных условий), имеющие продолжительные ряды данных с высокой достоверностью статистической оценки. Этим требованиям соответствуют два створа: Умба-Паялка (1932 - 2014 гг.) и Поной-Каневка (1953 - 2014 гг.).

Створ на р Умба, вблизи порога Паялка, существует с 14 июня 1930 года. Пост свайный расположен в 3,7 км от устья Белого моря, на левом берегу реки. Координаты поста 66°42' с. ш. и 34°18' в. д, площадь водосборного бассейна составляет 6470 км². Створ на р. Поной вблизи села Каневка, расположен в 14 км от устья Белого моря, на левом берегу реки. Координаты поста 66°37' с. ш. и 37°54' в. д, площадь водосборного бассейна составляет 10200 км² (табл. 3.5.1).

Долины рек проложены по разлому, U – образной формы с котловинными расширениями. Прилегающая местность характеризуется крупнохолмистым рельефом, с наличием большого количества заболоченных котлованов и незначительных озер. Склоны рассечены оврагами, балками - высотой до 50 м, крутые, каменистые поросшие смешанным лесом. Русло умеренно – извилистое, порожищенное с озеровидными плесами. Ледовый режим на участках гидрометрических постов устойчив. Ледообразование на реках в среднем начинается в конце октября, на плесах и озерах появляются забереги, а на порогах происходит интенсивное образование донного льда. Весенний ледоход наблюдается ежегодно, но он неинтенсивный. Продолжительность ледохода в близи истоков рек 8 - 20

дней, у устья – 1 - 5 дней. Полное «освобождение» от льда наблюдается примерно в середине мая.

Табл. 3.5.1. Характеристики анализируемых створов

Данные/створ	Умба-Паялка	Поной-Каневка
коэффициент шероховатости русла n , д.е	0,05	0,05
Уклон водной поверхности L , д.е	1,2	0,68
длина реки выше расчетного створа L_0 , км	119	312
водосборная площадь F_0 , км ²	6470	10200
Мощность водоносного горизонта, дренируемого рекой, m , м	20	30

Расчленение гидрографа речного стока проводилось методом Б. И. Куделина, в программных пакетах *Regim_3* и *GrWat*. Для ряда режимных измерений расхода рек допускается хронологическая неравномерность наблюдений.

Реализация в программе Regim_3. Программный пакет *Regim_3* является продуктом третьего поколения широко известной и применяемой в гидрогеологических и гидрометеорологических организациях программы REGIM, разрабатываемой Р. С. Штенгеловым с 1989 г.

Обрабатывает данные по расходам за заданный промежуток времени, допускаются пропуски. Для каждого календарного года считаются различные годовые характеристики стока, такие как: объем речного (V_p , м³) и подземного ($V_{п.}$, м³) стока, расходы речного (Q_p , м³/сут) и подземного ($Q_{п.}$, м³/сут) стока, модули поверхностного (M , л/с×км²) и подземного ($M_{п.}$, л/с×км²) стока. Через эти характеристики рассчитаны: приведенный модуль подземного стока ($M_{п.прив}$, (л/с×км²)/м), коэффициент подземного питания рек ($K_{пп}$, д.е.), Слой подземного ($У_{п.}$, мм/год) и поверхностного ($У$, мм/год) стока.

Пример расчета, данной программой, представлен в таблице 3.5.2.

Табл. 3.5.2. Фрагмент ежегодных результатов расчета для створов Поной-Каневка и Умба – Паялка в программном пакете *Regim_3*

Год/Параметр	Vреч стока, м ³	Qреч.сток а, м ³ /сут	Мреч. стока, л/с×км ²	Vподз стока, м ³	Qп, м ³ /сут	Мп, л/с×км ²	Мп.пр, л/с×км ² /м	Кпп	Уп, мм/год	У, мм/год
Поной - Каневка										
1953	1.60E+09	293.00	28.70	1.70E+08	31.10	3.10	0.10	10.80%	3.05E-06	2.82E-05
1961	1.75E+09	325.96	31.98	2.05E+08	46.70	4.58	0.15	14.32%	4.58E-06	3.20E-05
1969	1.58E+09	435.19	42.67	2.14E+08	59.07	5.79	0.19	13.57%	5.79E-06	4.27E-05
1993	1.49E+09	469.21	46.00	3.44E+08	107.70	10.56	0.35	22.96%	1.06E-05	4.60E-05
2000	2.83E+09	424.91	41.66	2.71E+08	40.77	3.40	0.11	8.16%	4.00E-06	4.90E-05
Среднее значение	1.64E+09	218.00	41.00	2.28E+08	30.00	7.00	0.16	14.72%	4.69E-06	3.92E-05
Умба - Паялка										
1932	1.16E+09	210.67	35.56	2.08E+08	37.69	5.83	0.29	16.39%	5.83E-06	3.55E-05
1941	4.79E+08	120.61	18.64	1.01E+08	25.48	3.94	0.20	21.14%	3.94E-06	1.86E-05
1952	7.60E+08	258.74	40.00	1.16E+08	39.55	6.11	0.31	15.28%	6.11E-06	4.00E-05
1963	4.88E+08	152.67	23.60	8.95E+08	27.98	4.33	0.22	18.35%	4.32E-06	2.36E-05
1971	6.80E+08	187.52	28.98	1.13E+08	31.02	4.79	0.24	16.53%	4.79E-06	2.90E-05
1980	3.33E+08	142.55	22.03	7.18E+07	30.78	4.76	0.24	21.61%	4.76E-06	2.20E-05
2014	7.50E+08	133.51	20.64	1.61E+08	28.62	4.42	0.22	21.41%	4.42E-06	2.07E-05
Среднее значение	6.73E+08	160.32	24.79	1.64E+08	31.69	4.91	0.25	19.87%	4.90E-06	2.48E-05

Реализация в программе GrWat. Программа GrWat делит суточные расходы воды на водохозяйственные года (т.е. от начала половодья этого календарного года до начала половодья следующего календарного года). Для каждого года считаются различные годовые характеристики стока, такие как: среднегодовой расход (Q_y , м³/сут), максимальный расход воды (Q_{max} , м³/сут), даты: начала половодья (Datestart), наступления максимального расхода воды (datemax); различные характеристики минимального стока: минимальный месячный расход воды летней ($Q_{mmsummer}$, м³/сут) и зимней (Q_{mmwin} , м³/сут) межени, номера месяцев, когда он наблюдается - летних (monmmsummer), зимних (Nommwin), минимальный 30, 10 и 5-суточный расход воды летней (Q_{30s} , Q_{10s} , Q_{5s} , м³/сут) и зимней (Q_{30w} , Q_{10w} , Q_{5w} , м³/сут) межени, даты начала (date30s(1), date10s(1), date5s(1), date30w(1), date10w(1), date5w(1)) и окончания (date30s(2), date10s(2), date5s(2), date30w(2), date10w(2), date5w(2)) для этих периодов; средний расход подземной составляющей речного стока за год (Q_{ygr} , м³/сут), объем половодья (W_{pol} , км³), (W_{po2} , км³), объем паводков (W_{pavs1} , км³), (W_{pavs2} , км³), величина паводков за счет осадков ($W_{pavthaw1}$, км³), ($W_{pavthaw2}$, км³), максимальный расход воды в период паводков ($Q_{maxpavs}$, м³/сут), дата этого расхода (datemaxpavs) максимальный расход воды в период паводков за счет осадков ($Q_{maxpavthaw}$, м³/сут), его дата (datemaxpavthaw).

В программе присутствуют калибруемые параметры (табл. 3.6.2). Они подбирались для двух створов на основании анализа гидрографа речного стока, по десятилетиям (табл. 3.5.2 – 3.5.3). Пример расчета, данной программой, представлен в таблице 3.5.4

Табл.3.5.3. Калибруемые параметры в программе GrWat

Название параметра	Условия, которые задает параметр
monme	месяц, с которого начинается зимняя межень
grad	интенсивность спада/подъема Q за счёт грунтовой составляющей, выраженная в долях от расхода предшествующего дня после спада
grad1	интенсивность спада/подъема Q на спаде половодья за счёт грунтовой составляющей, выраженная в долях от расхода предшествующего дня
kdQgr1	тах допустимое повышение грунтовой составляющей по сравнению с начальным значением (уже после спада половодья)
polmon (1)	самый ранний месяц, когда может наблюдаться начало половодья
polmon (2)	самый поздний месяц, когда может наблюдаться начало половодья
polkol(1)	количество дней с начала половодья с устойчивым увеличением в

Название параметра	Условия, которые задает параметр
	среднем =установленному градиенту polgrad(1)
polkol(2)	количество дней с начала половодья с устойчивым увеличением в среднем на ≥ 0 %
polkol(3)	количество дней с начала половодья, за которое проходит основная волна половодья
polgrad(1)	значения градиента устойчивого увеличения расхода в начале половодья
polgrad(2)	во сколько раз средний расход воды за половодье polkol(3) гарантированно превышает предшествующий половодью меженный уровень
prodspada	количество дней с даты максимального расхода действия grad, после этого переходит на grad1
nPav	количество дней, за которое анализируется сумма осадков и сумма температур, нечетное число
Pcr	мм осадков - критическая сумма, которая вызывает значимый паводок
Tcr1	С средняя температура за nPav, $\leq$ которой - снег, $>$ тогда паводки
Tcr2	С средняя температура за nPav когда наблюдается талый паводок
Tzam	С средняя суточная температура события "заморозок"
SignDelta	значимый перепад расходов (для выбора значимых спадов/подъемов при отделении паводков) в долях от максимального расхода воды этого года
SignDelta1	=SignDelta*0.15 !значимый перепад для поиска лок.максимума

Табл.3.5.4 Подбор параметров для двух створов

Годы	Створ	Параметры					
		моме	polmon(1)	polmon(2)	polkol(1)	polkol(2)	polkol(3)
1931-1940	Поной-Каневка	11	-	-	-	-	-
	Умба-Паялка		12	5	14	20	25
1941-1950	Поной-Каневка		-	-	-	-	-
	Умба-Паялка		4	5	13	14	30
1951-1960	Поной-Каневка		4	5	18	14	30
	Умба-Паялка		4	5	9	12	30
1961-1970	Поной-Каневка		4	5	14	14	35
	Умба-Паялка		3	5	14	16	20
1971-1980	Поной-Каневка		4	5	15	14	30
	Умба-Паялка		4	5	10	15	25
1981-1990	Поной-Каневка		4	5	10	13	25
	Умба-Паялка		4	5	8	13	25
1991-2000	Поной-Каневка		4	5	15	16	40
	Умба-Паялка		4	5	10	13	25
2001-2010	Поной-Каневка		4	5	14	17	30
	Умба-		4	5	16	15	25

Годы	Створ	Параметры					
		mome	polmon(1)	polmon(2)	polkol(1)	polkol(2)	polkol(3)
2011-2020	Паялка						
	Поной-Каневка		2	4	11	16	35
	Умба-Паялка		4	5	9	21	30
Принимаемое значение	Поной-Каневка		2	5	14	15	32
	Умба-Паялка		3		11		26

Табл.3.5.5 Входные параметры в программу GrWat

Параметр/Створ	Поной-Каневка	Умба-Паялка
mome	11	11
grad	1.5	1.5
grad1	2.5	2.5
kdQgr1	200	200
polmon (1)	2	3
polmon (2)	5	5
polkol(1)	14	11
polkol(2)	15	15
polkol(3)	32	26
polgrad(1)	2	2
polgrad(2)	1.4	1.4
prodspada	90	90
nPav	5	5
Pcr	20	20
Tcr1	0	0
Tcr2	2	2
Tzam	-0.5	-0.5
SignDelta	0.05	0.05
SignDelta1	0.0075	0.0075

Табл. 3.5.6 Фрагмент ежегодных результатов расчета для створов Пюной-Каневка и Умба–Паялка в программе GiWat

Пюной-Каневка																			
Year 1	Year 2	Date start	Date polend	Qy	Qmax	Date max	Qygr	Qmm summer	Mmm summer	Qn mwin	Nm mwin	Q80s	date30s (1)	date30s (2)	Q80w	date30w (1)	date30w (2)	Q10s	date10s (1)
2013	2014	6 май	13 июл	84.37	446.00	8 май	42.01	56.00	9.00	28.81	2.00	54.33	6 сен	5 окт	28.89	30 янв	28 фев	29.75	10 апр
date10s (2)	Q10w	date10w (1),	date10w (2)	Q5s	date5s (1)	date5s (2)	Q5w	date5w (1),	date5w (2)	Wpol1	Wpol2	Wpavs 1	Wpavs 2	Wpav thaw1	Wpav thaw2	Qmax pavs	Datemax pavs	Qmax pavthaw	Datemax pavthaw
15 сен	27.42	25 мар	3 апр	25.46	10 апр	14 апр	26.86	30 мар	3 апр	1.45	0.14	1.44	0.13	2.37	1.10	398.00	13 май	446.00	8 май
Умба-Паялка																			
Year 1	Year 2	Date start	Date polend	Qy	Qmax	Date max	Qygr	Qmm summer	Mmm summer	Qn mwin	Nm mwin	Q80s	date30s (1)	date30s (2)	Q80w	date30w (1)	date30w (2)	Q10s	date10s (1)
1948	1949	31 мар	14 дек	78.79	236.00	17 май	30.27	27.16	4.00	27.16	4.00	27.69	31 мар	29 апр	32.19	16 мар	14 апр	21.87	31 мар
date10s (2)	Q10w	date10w (1),	date10w (2)	Q5s	date5s (1)	date5s (2)	Q5w	date5w (1),	date5w (2)	Wpol1	Wpol2	Wpavs 1	Wpavs 2	Wpav thaw1	Wpav thaw2	Qmax pavs	Datemax pavs	Qmax pavthaw	Datemax pavthaw
9 апр	30.26	27 мар	5 апр	19.60	31 мар	4 апр	29.84	30 мар	3 апр	2.23	1.23	1.35	0.35	1.02	0.02	146.00	29 июл	60.50	28 дек

3.6. *Влияние вариаций климата на подземный сток северо-восточной части Балтийского щита*

Оценивая общую тенденцию изменения стока рек, выделены периоды повышенной и пониженной водности. Неоднократная смена этих периодов позволяет говорить об общей цикличности изменения водности, связанной с циклическими изменениями климата.

Начало зимней межени смещается на более поздние сроки и смещается начало кривой спада расходов воды. Снеготаяние начинается раньше, вследствие чего продолжительность межени уменьшается. Увеличение подземного стока в зимний период влечет за собой повышение уровней подземных вод, а общее повышение температуры воздуха приводит, как следствие, к увеличению температуры почв и подземных вод. Изменение водного режима «поддерживается» или даже усиливается аккумуляцией влаги в водосборных бассейнах на фоне заболачивания территории.

Для выявления факторов, определяющих эти периоды, расходы воды в реках сопоставлялись с данными по изменению климатических характеристик (осадков и температур воздуха).

В современное время естественный режим речного стока рек, нарушен хозяйственной деятельностью человека, что приводит к изменению однородности многолетних рядов. Оценить степень влияния климатических и антропогенных факторов на речной сток возможно с помощью восстановления естественных характеристик стока.

В регионе наблюдается смещение времени начала половодья (рис. 3.7.1.). В более водные года, наблюдается большее количество паводков. Продолжительность половодья имеет тенденцию к уменьшению (рис 3.7.2.), об этом свидетельствуют отрицательные линейные тренды. Минимальная продолжительность на створе Умба – Паялка 21 дней, Поной – Каневка 22 дня, максимальная – 42, 40 дней, соответственно.

Изменение подземного стока на створе Поной-Каневка, за период наблюдения с 1953 по 2014 гг, описывает положительный линейный тренд, вклад в общую дисперсию процесса составляет 0,01 д. е. Максимальное значение подземного стока 71,40 м³/сут (1971 г), минимальное – 12,82 м³/сут (2012 г). Для створа Умба-Паялка (1932 - 2014 гг) изменение подземного стока характеризуется отрицательным линейным трендом, вклад в общую дисперсию процесса составляет 0,01 д. е. Максимальное значение подземного стока 62,19 м³/сут (1943 г), минимальное – 12,61 м³/сут (1942 г).

Аналогичная картина наблюдается при анализе изменения модуля подземного стока на этих створах. Для створа Поной-Каневка изменения модуля подземного стока во времени описываются положительным линейным трендом, вклад в общую дисперсию процесса

составляет 0,02 д. е. Максимальное значение модуля подземного стока $10,56 \text{ л/с км}^2$ (1993 г), минимальное – $1,26 \text{ л/с км}^2$ (2012 г). На створе Умба-Паялка изменение модуля подземного стока характеризуется отрицательным линейным трендом, вклад тренда в общую дисперсию процесса составляет 0,01 д. е. Максимальное значение модуля подземного стока $9,61 \text{ л/с км}^2$ (1943 г), минимальное – $1,95 \text{ л/с км}^2$ (1942 г).

Значения коэффициента вариации для данных створов 0,61 (Поной-Каневка) и 0,32 (Умба-Паялка) указывают на значительные колебания подземного стока от года к году. Для створа Поной-Каневка эти изменения более существенны.

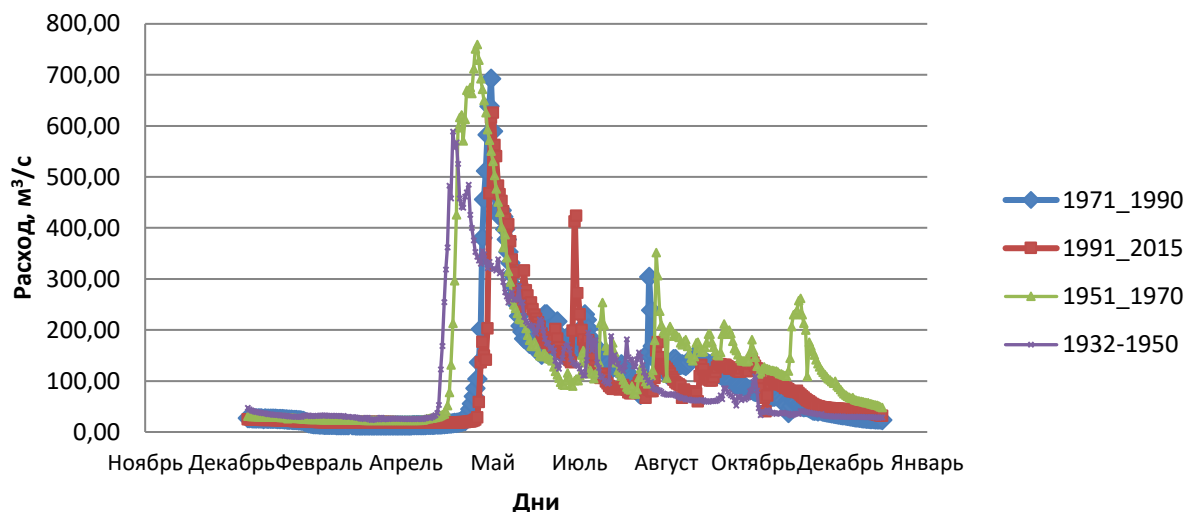


Рис. 3.6.1. Изменение гидрографов на створе Поной – Каневка

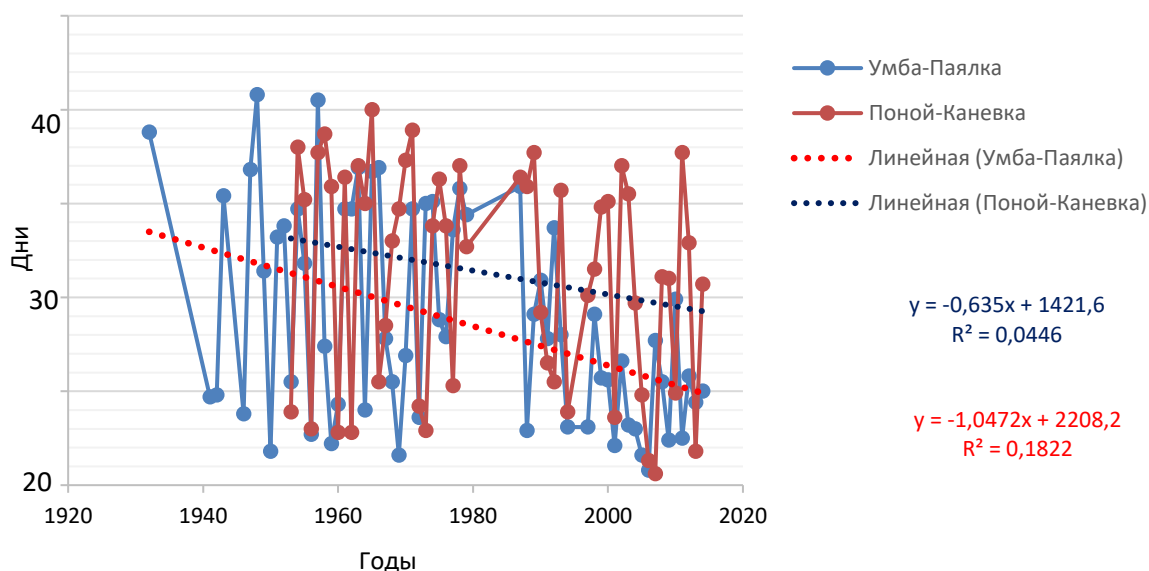


Рис.3.6.2. Продолжительность половодья на створах Умба-Паялка, Поной-Каневка

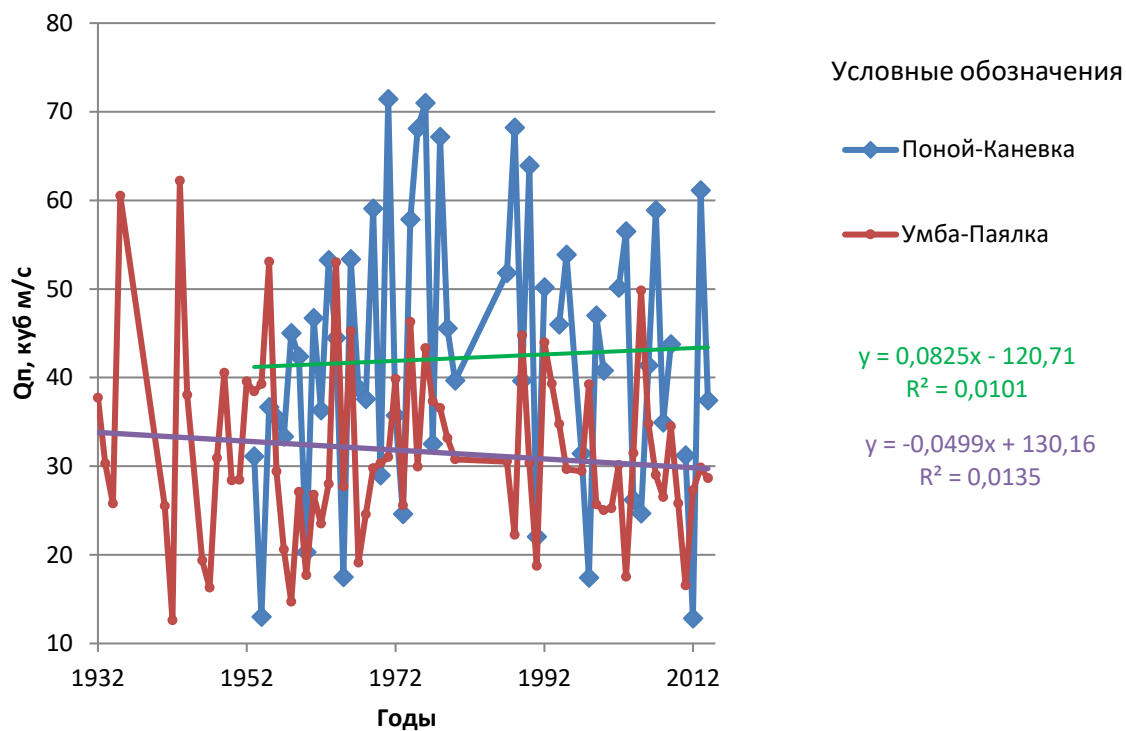


Рис.3.6.3. Изменение расхода подземного стока во времени на створах: Поной-Каневка, Умба-Паялка

Табл.3.6.1. Статистические расчеты для модуля подземного стока на створах: Поной-Каневка, Умба-Паялка

Параметр/Створ	Поной-Каневка	Умба-Паялка
Св	0.61	0.32
Cs	0.77	0.77
σ	4.24	1.57
D	0.00	2.44
K	-	-0.11

Заключение

Знания о подземном питании рек и его динамике способствуют развитию теории гидрологических расчетов и прогнозов речного стока, более глубокому анализу условий формирования речного стока, его внутригодового распределения и динамики, формирования всех видов водных ресурсов. Изучение подземного стока и определение его количественной характеристики может обеспечить успешное решение народнохозяйственных задач, связанных с комплексным использованием и охраной водных ресурсов, целенаправленным управлением поверхностным и подземным стоком, прогнозированием минимальных расходов рек для гидроэнергетического проектирования, судоходства, лесосплава, ирригации, водоснабжения и других отраслей народного хозяйства.

Исследуемые выборки данных наблюдений по расходам воды, температуре приземного воздуха и количеству атмосферных осадков репрезентативны соответствующим генеральным совокупностям для исследуемого региона.

Обнаруженные изменения температуры воздуха реальны, так как превосходят стандартную ошибку расчета величины изменений.

Параметры уравнений трендов 1-го и 2-го порядков в многолетнем ходе температуры воздуха статистически значимы. Оценки достоверностей трендов 1-го и 2-го порядков в многолетнем ходе температуры воздуха неслучайны, однако их значения не превышают 50%.

Обнаруженные изменения количества атмосферных осадков намного меньше стандартной ошибки расчета величины изменений и, следовательно, статистически не достоверны.

При анализе подземного и речного стока выделены периоды повышенной и пониженной водности. Неоднократная смена этих периодов позволяет говорить об общей цикличности изменения водности, связанной с циклическими изменениями климата.

Начало зимней межени смещается на более поздние сроки и смещается начало кривой спада расходов воды. Снеготаяние начинается раньше, вследствие чего продолжительность межени уменьшается. Увеличение подземного стока в зимний период влечет за собой повышение уровней подземных вод, а общее повышение температуры воздуха приводит, как следствие, к увеличению температуры почв и подземных вод.

В современное время естественный режим речного стока рек, нарушен хозяйственной деятельностью человека, что приводит к изменению однородности многолетних рядов. Оценить степень влияния климатических и антропогенных факторов на речной сток возможно с помощью восстановления естественных характеристик стока.

Значения коэффициента вариации для изучаемых створов указывают на значительные колебания подземного стока от года к году.

По результатам работы получены следующие результаты

- о Сформирован уникальный массив эмпирических данных по расходам воды, температуре приземного воздуха и количеству атмосферных осадков, отвечающий требованиям ВМО по длительности, однородности, достоверности и репрезентативности, необходимых для исследований влияния изменений климата на подземные воды восточной части Балтийского щита;

- о Многолетние межгодовые изменения температуры приземного воздуха статистически значимы, а значения углового коэффициента тренда превышают стандартную ошибку его определения. Однако, значения коэффициентов детерминации трендов (или оценки достоверностей трендов) не превышают 50%, а в ряде случаев значительно меньше;

- о Для описания многолетних межгодовых изменений количества атмосферных осадков оптимальной является модель случайного процесса с присущей ему изменчивостью;

- о Использование при анализе многолетних вариаций климата выборочных статистических оценок, а не их ансамбля, порождает опасность формирования статистически недостоверных суждений об их характере;

- о Рассчитаны и проанализированы многолетние межгодовые изменения подземного стока в северо-восточной части Балтийского щита;

- о Начало зимней межени смещается на более поздние сроки и смещается начало кривой спада расходов воды. Снеготаяние начинается раньше, вследствие чего продолжительность межени уменьшается. Увеличение подземного стока в зимний период влечет за собой повышение уровней подземных вод, а общее повышение температуры воздуха приводит, как следствие, к увеличению температуры почв и подземных вод. Однако коэффициенты детерминации указанных направленных изменений составляют всего лишь 1-4%;

- о Значения коэффициентов вариации для изучаемых створов указывают на значительные колебания подземного стока от года к году;

- о Ансамбль статистических оценок не свидетельствуют о статистически значимом влиянии климатических девиаций последних десятилетий на подземный сток в северо-восточной части Балтийского щита.

Список литературы

1. Алексеев Г. В., Подгорный И. А., Священников П. Н. Колебания отепляющего влияния океанов на глобальный климат // Докл. АН СССР – 1991 - 320:1. – С. 70–73.
2. Амусья А. З., Ратнер Н.С., Соколов Б.Л. Минимальный сток рек: состояние и перспективы исследований // Труды ГГИ, 1991. – вып.355. – С. 3– 28.
3. Анисимов О.А., Лобанов В.А., Ренева С.А. Анализ изменений температуры воздуха на территории России и эмпирический прогноз на первую четверть 21 века //Метеорология и гидрология. 2007. № 10. С. 20-30.
4. Анискина Н. А. Исследование зависимости годового стока рек СССР от атмосферной циркуляции // Труды ГГИ. - 1970.- вып.179. - С. 63-98.
5. Бельчиков В. А., Полунин А. Я., Симонов Ю. А., Христофоров А. В. Оценка возможных климатических изменений стока рек бассейна Северной Двины в XXI в // Метеорология и гидрология. - 2013. – №2 - С. 84– 92.
6. Богданова Э. Г., Гаврилова С. Ю., Ильин Б. М. Временные изменения атмосферных осадков на территории России по данным их скорректированных значений за период 1936–2000 гг. // Метеорология и гидрология - № 10 - 2010. - С. 78–89.
7. Болгов М. В., Лепихин А. П. Региональные водные проблемы и актуальные задачи гидрологических исследований. // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление - № 2 - 2020. - С. 5–6.
8. Болгов М. В., Сарманов И. О. Усеченное трехпараметрическое гамма-распределение С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля и некоторые его приложения к гидрологическим расчетам. // Водные ресурсы - № 2 - 1988. - С. 24–29.
9. Большиянов Д.Ю., Священников П.Н., Федоров Г.Б., Павлов М.В., Терехов А.В. Изменения климата Арктики за последние 10 000 лет // Известия Русского Географического общества. 2002. - Том 134. Выпуск 1. - С. 20-27.
10. Боровский Б. В., Язвин Л. С., Зекцер И.С. Современные проблемы изучения и использования питьевых подземных вод // Водные ресурсы. - 2003. – Т.30. – №4 - С. 507– 510.
11. Боровский Б. В., Язвин Л. С. Актуальные проблемы геологического изучения недр при оценке запасов питьевых подземных вод в начале XXI века. Пути решения // Недропользование XXI век. - 2019. – №6 (82)- С. 12– 18.
12. Воскресенский К. П. Норма и изменчивость годового стока рек СССР. - Л.: Гидрометеиздат, 1967. – С. 546.

13. Всеволожский В. А., Кочеткова Р. П., Фиделли И. Ф. Принципы гидрогеологического районирования по условиям формирования и распределения естественных ресурсов пресных подземных вод // Водные ресурсы – 2003. - том 30 - М 3 - С. 261-274.
14. Гельфан А. Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока М.: Наука, 2007. С. 279.
15. Гельфан А. Н., Калугин А. С., Крыленко И. Н., Лавренова А. А., Мотовилов Ю. Г. Гидрологические последствия изменения климата в крупных речных бассейнах: опыт совместного использования региональной гидрологической и глобальных климатических моделей // Вопросы географии– 2018. - №145 - С. 49-63.
16. Гельфан А. Н., Калугин А. С., Крыленко И. Н., Насонова О. Н., Гусев Е. М. Ковалев Е. Э. О проблеме тестирования гидрологической модели для оценки влияния изменений климата на речной сток // Метеорология и гидрология– 2020. - №5 - С. 77-85.
17. Георгиевский В. Ю., Коронкевич Н. И., Алексеевский Н. И. The impact of climate change on water resources and the hydrological regime of the rivers of the russian federation // Использование и охрана природных ресурсов в России. — 2015. — 5. — С. 143–41.
18. Георгиевский В. Ю., Ежов А. В., Шалыгин А. Л. и др. Оценка влияния возможных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек территории бывшего СССР // Метеорология и гидрология – 1996а. - №11 - С. 89-99.
19. Георгиади А. Г., Кашутина Е. А. Долговременные изменения стока крупнейших сибирских рек // Известия Российской академии наук. Серия географическая. — 2016. — № 5. — С. 70–81.
20. Георгиади А. Г., Милюкова И. П. Масштабы гидрологических изменений в бассейне р. Волга, возможные при антропогенном изменении климата // Метеорология и гидрология. – 2002. – № 2. – С. 5-15.
21. Гинзбург Б. М., Полякова К. Н., Солдатов И.И. Вековые изменения сроков появления льда на реках и их связь с изменением климата // Метеорология и гидрология – 1992. - №12- С. 71-79.
22. Гинзбург Б. М., Сильницкая М. И. Влияние распределения температуры поверхности океанов на сроки замерзания и вскрытия рек азиатской территории России // Метеорология и гидрология – 2004. - №1- С. 82-88.
23. Гопченко Е. Д., Лобода Н. С. Оценка возможных изменений водных ресурсов Украины в условиях глобального потепления // Гидробиологический журнал. - Киев: Институт гидробиологии НАН Украины. - Т.36 - №3. - 2000. - С. 67 - 78.

24. Гриневский С. О., Поздняков С. П. Ретроспективный анализ влияния климатических изменений на формирование ресурсов подземных вод // Вестник Московского университета. Сер. 4, Геология. - 2017. - № 2. - С. 42-50.
25. Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Колебания и изменения климата на территории России // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 2. С. 66–185.
26. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата // Метеорология и гидрология. 2004. № 4. С 50–66.
27. Джамалов, Р. Г. и др. Изменение подземного стока под влиянием климата и антропогенных воздействий // Водные ресурсы. - 2008. - Т.35. - № 1. - С. 17 -24
28. Джамалов Р.Г., Сафронова (а) Т.И. Ресурсы подземных вод по частям света и странам мира. // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2010. № 3. С. 52-60.
29. Дзюба А. В. Формализация дальней корреляционной связи североатлантического колебания и температурного режима атлантико-евразийской приполярной зоны // Метеорология и гидрология – 2009. - №5- С. 16-33.
30. Дзюба А. В. Зекцер И. С. Неопределенности оценки влияния современных вариаций климата на подземные воды // Доклады Академии наук – 2016. – Т.466. - №1- С. 88-91.
31. Дзюба А. В. Зекцер И. С. Субмаринный подземный сток и возможный механизм разрушения морских метаногидратов в арктике // Доклады Академии наук – 2011. – Т.441. - №6- С. 816-820.
32. Дзюба А.В., Зекцер И.С. Изменения субмаринного подземного стока и возможный механизм разрушения морских арктических гидратов метана. //Водные ресурсы. 2013. т. 40. № 1. С. 83-94
33. Дзюба А.В., Зекцер И.С. Взаимосвязь подземных вод криолитозоны и изменений климата. // Водные ресурсы. – 2011. – Т. 38. – № 1. – С. 20-29
34. Дзюба А.В., Зекцер И.С. Изменения климата и многолетнемерзлые породы: прямые и обратные связи // Доклады Академии наук. - 2009. - Т. 429, N 3. - С. 402-405
35. Дзюба А. В., Ковалева А. А. Опасность недостоверной оценки влияния современных климатических вариаций на питание подземных вод. // Сергеевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи. – вып. 18. – М.: РУДН, 2016. – С. 487-492.
36. Дзюба А. В. Логинов В. Ф. К вопросу о достоверности оценок климатически обусловленных изменений ресурсов подземных вод // Вода: химия и экология – 2017. - №3 (105)- С. 46-55.

37. Добровольский С. Г. Проблема глобального потепления и изменений стока российских рек. // Водные ресурсы, 2007. Т. 34. С. 643 – 655.
38. Добровольский С. Г. Глобальные изменения речного стока. – М.:ГЕОС, 2011. – С. 660.
39. Дроздов В. В., Смирнов Н. Пё. Влияние крупномасштабных циркуляционных процессов в атмосфере на температурный режим Беломорского региона. // Проблемы Арктики и Антарктики. - № 3 (89). - 2011. - С. 78–88.
40. Жильцова Е.Л., Анисимов О.А. О точности воспроизведения температуры и осадков на территории России глобальными климатическими архивами // Метеорология и гидрология. 2009. № 10. С. 79-90.
41. Жук В. А., Евстигнеев В. М. Исследование синхронности колебаний годового стока отдельных регионов приемами факторного анализа. // Труды ВНИИГМИ-МЦД. - М.: Гидрометиздат, 1993. - С. 78-91.
42. Зайков, Б. Д. Средний сток и его распределение в году на территории СССР - Л.: Гидрометеиздат, 1946. – С. 148.
43. Зверев В. П. Особенности последствия геологического круговорота подземных вод// Доклады Академии наук – 2009. – Т.425. - №4 - С. 509-512.
44. Зверев В.П. Вода в Земле. М.: Научный мир, 2009. С. 252
45. Зекцер И. С., 1977. Закономерности формирования подземного стока и научно-методические основы его изучения. Изд. Наука, Москва, С. 174.
46. Зекцер И. С., 2012. Подземный сток и ресурсы пресных подземных вод. Изд. Научный мир, Москва, С. 374.
47. Зекцер И. С., Дзюба А.В. Подземный сток в моря Северного Ледовитого океана с Европейской территории России. // Водные ресурсы. – 2010. –Т. 37. – № 6 - С. 643-649.
48. Зекцер И. С., Ковальский Л. Б. Гидрогеологические условия формирования подземного стока в реки на территории Карело-Кольского региона воды // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. - 1963. - №5 - С. 64-170.
49. Израэль Ю. А. Исследования влияния изменения климата // Метеорология и гидрология. - №4. – 1991. - С. 29-35.
50. Исмайылов Г.Х., Голубаш Т.Ю. Оценка влияния возможных изменений климата на составляющие водного баланса р. Волги // Труды Академии водохозяйственных наук. Вып.5. - 1998.
51. Катцов, В. М., Говоркова, В. А., 2013. Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха, осадков и годового стока на территории России в XXI-м веке: результаты

- расчетов с помощью ансамбля глобальных климатических моделей (CMIP5). Труды ГГО 569, С. 75–97.
52. Ковалевский В. С. Влияние изменений климата на подземные воды // Водные ресурсы. - Т. 34, N 2. -2007. - С. 158-170.
53. Ковалевский В.С, Семенов С.М, Ковалевский Ю.В. Воздействия климатических изменений на подземные воды и взаимосвязанную с ними окружающую среду // Геоэкология. 1997. № 5. С. 16-29.
54. Ковалевский В.С., Семенов С.М., Ковалевский Ю.В. Методы и результаты прогнозных оценок воздействия глобальных изменений климата на экологическое состояние подземных вод и сопряженных природных сред // Глобальные изменения природной среды. Новосибирск: СО РАН, 1998. - С. 287–302.
55. Ковалевский В.С., Федорченко Е.А., Клиге Р.К. О возможном изменении запасов и уровней грунтовых вод в бассейне р. Волги в связи с изменением климата // Изв. РАН Сер. геогр. 1999. - № 5. - С. 63–69.
56. Кондратьев К. Я. Изменения глобального климата: нерешенные проблемы // Метеорология и гидрология. - № 6.- 2004. - С. 118–127.
57. Логинов В.Ф. Глобальные и региональные изменения климата: причины и следствия. - Минск: ТетраСистемс, 2008. – С. 495.
58. Логинов В.Ф. Современные изменения глобального и регионального климата / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко: нац. акад. наук Беларуси, ин-т природопользования - Минск: Беларуская наука, 2019. – С. 315.
59. Логинов В.Ф., Лысенко С.А. Оценка роли Тихого океана в изменениях современного климата // Известия РАН. Серия географическая. - 2019. - №3. - С. 3-12. doi: 10.31857/S2587-5566201933-12
60. Лось Е. И. Некоторые закономерности формирования подземного стока в водные системы Карелии (на примере озерно-речной системы Шуи-Онежской) // Водные ресурсы. - 1977. - № 1. - С. 105-118.
61. Лурье П.М., Панов В.Д. Влияние изменений климата на гидрологический режим р. Дон в начале XXI столетия // Метеорология и гидрология, 1999. – №4. – С. 90–97.
62. Магрицкий Д. В. Тепловой сток рек в моря Российской Арктики и его изменения // Вестник Московского университета. Сер. 5, География. - 2009. - № 5. - С. 69-77.
63. Моисенко Т. И., Базова М. М., Ефимова Л. Е. Изменение химического состава вод малых озер Кольского севера вследствие снижения аэротехногенного загрязнения и потепления климата // Доклады Академии наук – 2014. – Т.456. - №1- С. 87-91.

64. Морозов П. Н. Подземный сток и методы его определения (конспект лекций) - Л.: Гидрометеиздат, 1975. – С. 59.
65. Мотовилов Ю. Г. Моделирование полей речного стока (на примере бассейна р. Лена. // Метерология и гидрология. - 2017. - № 2. - С. 78-88.
66. Мотовилов Ю. Г. Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственных масштабах. 2. Результаты испытаний // Водные ресурсы. - 2016. – Т.43. - № 5. - С. 467-475.
67. Оберман Н.Г., Бусыгина Е.Н. Изменения ресурсов и запасов грунтовых вод криолитозоны Печоро-Уральского региона при потеплении климата. // Водные ресурсы, 2009, том 36, №6, С. 757-761.
68. Оберман Н.Г., Какунов Н.Б. Мониторинг подземных вод криолитозоны Северо-Востока Европейской части России и Урала. В кн.: Мониторинг подземных вод криолитозоны. – Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2002. С. 18-43.
69. Поздняков С. П., Гриневский С. О., Дедюлина Е. А. Влияние климатических изменений на многолетнюю динамику сезонного промерзания в московском регионе: ретроспективный анализ и неопределенности прогноза на вторую половину XXI века // Криосфера земли. - 2019. – Т.23. - № 4. - С. 26-35.
70. Поздняков С. П., Гриневский С. О., Дедюлина Е. А., Самарцев В. Н. Модельный анализ наблюдаемых прогнозных климатических изменений инфильтрационного питания подземных вод в бассейне малой реки // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. - 2019. – № 3. - С. 78-86.
71. Раткович Д. Я. Актуальные проблемы стохастической гидрологии // Водные ресурсы. - 2000. – – Т.27. - № 6. - С. 645.
72. Романенко Ф. А., Шиловцева О. А. Геоморфологические процессы в горах Кольского полуострова и изменения климата // Вестник Московского университета. Серия 5: География. - 2016. – № 6. - С. 78-86.
73. Семенов А. В. Взаимосвязь изменения климата с гидрологическими характеристиками рек Кольского полуострова. // отчет Мурманского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – 2009.
74. Филатов Н. Н., Л. Е. Назарова, А. П. Георгиев, А. В Семенов и др. Изменения и изменчивость климата европейского Севера России и их влияние на водные объекты. Арктика экология и экономика №2(б), 2012 С. 80-93
75. Шикломанов И.А., Шикломанов А.И. Изменения климата и динамика притока речных вод в Северный Ледовитый океан. Водные ресурсы, - том 30, - №6, - 2003. С. 645-654

76. Школьник, И. М., Мелешко, В. П., Кароль, И. Л., Киселев, А. А., Надежина, Е. Д., Говоркова В. А., Павлова, Т. В., 2014. Ожидаемые изменения климата на территории Российской Федерации в XXI веке. Труды ГГО 575, С. 65–118.
77. Антропогенные изменения климата / Под ред. М. И. Будыко, Ю. И. Израэля. - Л.: Гидрометеиздат, - 1987. С. 406.
78. Архив температуры воздуха и осадков месячного разрешения для территории России. 2019. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД. <http://meteo.ru/>.
79. Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Техническое резюме. М.: Росгидромет. 214. С. 94.
80. Исследования и расчеты речного стока / Под ред. В. Д. Быкова. - М.: Изд-во МГУ, 1981. С. 228.
81. Кольский полуостров / Кольская энциклопедия в 5 т. / гл. ред. А. Н. Виноградов. – СПб.: Апатиты КНЦ РАН, 2009.
82. МУ: Методические указания к IV части Справочника по климату СССР. Раздел 2. Атмосферные осадки. Введение поправок на недоучет осадков осадкомером. 1966. Л. ГГО. С. 18.
83. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3. Ч. 1. Метеорологические наблюдения на станциях, 1969. Л. Гидрометеиздат. С. 307.
84. Подземный сток и методы его исследования. / Под ред. Б. И. Куделина. – М.: Наука, 1972. С. 136.
85. Турбулентность, динамика атмосферы и климата. / Под ред. Г. С. Голицина, И. И. Мохова, С. Н. Куличикова, М. В. Купчвнскго, И. А. Репиной, О. Г. Чхетиани. – М.: Физматкнига, 2018. С. 586.
86. Aguilera, H. and J.M. Murillo, 2009: The effect of possible climate change on natural groundwater recharge based on a simple model: a study of four karstic aquifers in SE Spain. *Environmental Geology*, 57(5), 963-974.
87. Ahn, K.-H. and V. Merwade, 2014: Quantifying the relative impact of climate and human activities on streamflow. *Journal of Hydrology*, 515, pp. 257-266, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.062>.
88. Allen, D.M., A.J. Cannon, M.W. Toews, and J. Scibek, 2010: Variability in simulated recharge using different GCMs. *Water Resources Research*, pp. 46, W00F03, doi:[10.1029/2009WR008932](https://doi.org/10.1029/2009WR008932).

89. Allen D. M., Mackie D. C., Wei M. 2004. Groundwater and climate change: a sensitivity analysis for the grand forks aquifer, southern British Columbia, Canada. *Hydrogeol. J.* 12 (3). pp. 270–290.
90. Arnell, N. W., Climate change and global water resources. *Global Environmental Change* 9, 1999. – pp. 31–S49.
91. Babel M. S., Gupta A. D., Domingo S.N.D., Kamalamma A. G. 2007. Sustainable groundwater management in Bangkok. *Sustainable Groundwater Management in Asian Cities*. Hayama: IGES, pp. 26 – 43.
92. Barthel R. An indicator approach to assessing and predicting the quantitative state of groundwater bodies on the regional scale with a special focus on the impacts of climate change. // *Hydrogeology Journal* 19, 2011. – pp. 525–546.
93. Barthel, R., S. Janisch, D. Nickel, A. Trifkovic, and T. Hoerhan, 2010: Using the multiactor-approach in Głowa-Danube to simulate decisions for the water supply sector under conditions of global climate change. *Water Resources Management*, 24(2), pp. 239-275.
94. Bates, B. C., Kundzewicz Z. W, S. Wu and Palutikof J. P., Eds., 2008: *Climate Change and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, pp. 210.
95. Bengtsson L., *Numerical modeling of the Earth's Climate*. Publ. of Max-Planck Inst. for Meteorology, Hamburg, 1997. – pp. 94.
96. Berghuijs, W. R., J. R. Larsen, T. H. M. van Emmerik and R. A. Woods, 2017b: A Global Assessment of Runoff Sensitivity to Changes in Precipitation, Potential Evaporation, and Other Factors. *Water Resources Research*, 53 (10), pp. 8475-8486, doi:10.1002/2017wr021593.
97. Bhandari H., Shivakoti G.P.. 2005. Groundwater markets and irrigation potential in South Asia: A micro study from Nepal. In *Asian irrigation in transition*, edited by G.P. Shivakoti, D.L. Vermillion, W. Lam, E. Ostrom, U. Pradhan and R. Yoder, pp. 127-153. Sage Publication, New Delhi, Thousand Oaks, London.
98. Carneiro, J.F., M. Boughriba, A. Correia, Y. Zarhloule, A. Rimi, and B. El Houadi, 2010: Evaluation of climate change effects in a coastal aquifer in Morocco using a density-dependent numerical model. *Environmental Earth Sciences*, 61(2), pp. 241-252.
99. Covey, C., K.M.Achuta Rao, U. Cubasch, P. Jones, S.J. Lambert, M.E. Mann, T.J. Phillips and K.E. Taylor, 2003: An overview of results from the coupled model intercomparison project. *Global Planet. Change*, 37, pp. 103-133

- 100.Crosbie, R.S., T. Pickett, F.S. Mpelasoka, G. Hodgson, S.P. Charles, and O.V. Barron, 2013a: An assessment of the climate change impacts on groundwater recharge at a continental scale using a probabilistic approach with an ensemble of GCMs. *Climatic Change*, 117(1-2), pp. 41-53.
- 101.Crosbie, R.S., B.R. Scanlon, F.S. Mpelasoka, R.C. Reedy, J.B. Gates, and L. Zhang, 2013b: Potential climate change effects on groundwater recharge in the High Plains Aquifer, USA. *Water Resources Research*, 49(7), pp. 3936-3951.
- 102.Cuthbert, M. O. et al., 2019b: Observed controls on resilience of groundwater to climate variability in sub-Saharan Africa. *Nature*, 572 (7768), pp. 230-234, doi:10.1038/s41586-019-1441-7.
- 103.Dai, A., 2016b: Historical and Future Changes in Streamflow and Continental Runoff. In: *Terrestrial Water Cycle and Climate Change*, pp. 17-37.
- 104.Doll P., Fiedler K. Global-scale modeling of groundwater recharge. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2007. pp. 4069–4124. www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/4/4069/2007/
- 105.Doll P. Vulnerability to the impact of climate change on renewable groundwater resources: a global-scale assessment. *Environ. Res. Lett.*, 4, 2009.
- 106.Dragoni W., Sukhija B.S. 2008. *Climate Change and Groundwater: A Short Review*. Geological Society Special Publication. pp. 1–12
- 107.Earman, S., A.R. Campbell, F.M. Phillips, and B.D. Newman, 2006: Isotopic exchange between snow and atmospheric water vapor: estimation of the snowmelt component of groundwater recharge in the southwestern United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D9), D09302, doi:10.1029/2005JD006470.
- 108.Edmunds W. M. E. (2009) Palaeoclimate and groundwater evolution in Africa—implications for adaptation and management. *Hydrol. Sci. J.* 54. pp. 781-792.
- 109.Gelfan, A. et al., 2017: Climate change impact on the water regime of two great Arctic rivers: modeling and uncertainty issues. *Climatic Change*, 141 (3), pp. 499-515, doi:10.1007/s10584-016-1710-5.
- 110.Gosling, S. N. et al., 2017: A comparison of changes in river runoff from multiple global and catchment scale hydrological models under global warming scenarios of 1 °C, 2 °C and 3 °C. *Climatic Change*, 141 (3), 5 pp. 77-595, doi:10.1007/s10584-016-1773-3.
- 111.Grafton, R. Q., J. Williams and Q. Jiang, 2015: Food and water gaps to 2050: preliminary results from the global food and water system (GFWS) platform. *Food Security*, 7 (2), pp. 209-220, doi:10.1007/s12571-015-0439-8.

112. Gudmundsson, L., P. Greve and S. I. Seneviratne, 2017a: Correspondence: Flawed assumptions compromise water yield assessment. *Nature Communications*, 8 (1), 14795, doi:10.1038/ncomms14795
113. Hawkins, E. and R. Sutton, 2011: The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. *Climate Dynamics*, 37(1-2), pp. 407-418.
114. Hoegh-Guldberg, O., D. et al., 2018a: Impacts of 1.5°C of Global Warming on Natural and Human Systems. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change* [T. W. Masson-Delmotte, P. Z. V., H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skeea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor and T. Waterfield (eds.)], pp. 175–311.
115. Holman I. P., Tascone D., Hess T. M. A comparison of stochastic and deterministic downscaling methods for modelling potential groundwater recharge under climate change in East Anglia, UK: implications for groundwater resource management. *Hydrogeology Journal* (2009) 17. pp. 1629–1641.
116. Hoque, M. A. et al., 2016: Drinking water vulnerability to climate change and alternatives for adaptation in coastal South and South East Asia. *Climatic Change*, 136 (2), pp. 247-263, doi:10.1007/s10584-016-1617-1.
117. Jiang, X.Y., G.Y. Niu, and Z.L. Yang, 2009: Impacts of vegetation and groundwater dynamics on warm season precipitation over the Central United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, pp. 114, D06109, doi:10.1029/2008JD010756.
118. Jiménez Cisneros, B.E., T. Oki, N.W. Arnell, G. Benito, J.G. Cogley, P. Döll, T. Jiang, and S.S. Mwakalila, 2014: Freshwater resources. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 229-269.
119. Karl, T. and K. Trenberth, 2003: Modern global change. *Science*, 302, pp. 1719-1722.
120. Kaspar, F., 2003: Entwicklung und Unsicherheitsanalyse eines globalen hydrologischen Modells (Development and uncertainty analysis of a global hydrological model). PhD dissertation, University of Kassel, Germany, pp. 139.

- 121.Kharin, V.V., F.W. Zwiers, X. Zhang, and M. Wehner, 2013: Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble. *Climatic Change*, 119(2), pp. 345-357.
- 122.Kong, D., C. Miao, J. Wu and Q. Duan, 2016: Impact assessment of climate change and human activities on net runoff in the Yellow River Basin from 1951 to 2012. *Ecological Engineering*, 91, pp. 566-573, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.02.023>.
- 123.Kingston D., Taylor R. G. (2010) Projected impacts of climate change on groundwater and stormflow in a humid, tropical catchment in the Ugandan Upper Nile Basin. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 7. pp. 1913-1944.
- 124.Kukal M., Irmak S. Long-term patterns of air temperatures, daily temperatures range, precipitation, grass-reference evapotranspiration and aridity index in the USA Great Plains: Part 2. Temporal trends. // *journal of Hydrology* 542 - 2016. pp. 978-1001.
- 125.Kumar C. P. Impact of Climate Change of Agriculture // *International Journal of Engineering Research and Management (IJERM)* - 1 - 2014. – pp. 151-156.
- 126.Kundzewicz Z. W., Doll P. Will groundwater ease freshwater stress under climate change *Hydrol. Sci. J.* 54 (4). 2009. – pp. 665-675.
- 127.Kundzewicz, Z.W., L.J. Mata, N.W. Arnell, P. Döll, P. Kabat, B. Jiménez, K.A. Miller, T. Oki, Z. Sen and I.A. Shiklomanov, 2007: Freshwater resources and their management. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 173-210. AIICC 4
- 128.Liu, H., 2011: Impact of climate change on groundwater recharge in dry areas: an ecohydrology approach. *Journal of Hydrology*, 407(1-4), pp. 175-183.
- 129.Loaiciga H.A. Global variations in the chemistry of ground water. 2007. In *Types and Properties of Ground Water*, volume 2 of the *Encyclopedia of Life Support Systems*, M.G. Khublaryan, editor, EOLSS Publishers Co., Oxford, U.K.
- 130.Loaiciga H.A. Submarine ground discharge and modern-age climatic change. 2007. In *Submarine Groundwater*, pp. 234-244, I.S. Zektser and R.G. Dzhamalov, eds., CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida
- 131.Loaiciga H A, Maidment D R, Valdes J B 2000 Climate-change impacts in a regional karst aquifer, Texas, USA *J. Hydrol.* 227, pp. 173–194.
- 132.Loaiciga H.A., Valdes J.B., Vogel R., Garvey J., Schwarz H. Global warming and the hydrologic cycle. *J. Hydrol.* 1996. 174 (1–2). pp. 83–127.

133. Mahlstein, I., R.W. Portmann, J.S. Daniel, S. Solomon, and R. Knutti, 2012: Perceptible changes in regional precipitation in a future climate. *Geophysical Research Letters*, 39, L05701, doi:10.1029/2011GL050738.
134. Masterson, J.P. and S.P. Garabedian, 2007: Effects of sea-level rise on ground water flow in a coastal aquifer system. *Ground Water*, 45(2), pp. 209-217.
135. McCallum J. L., Crosbie R. S., Walker G. R., Dawes W. R. (2010), Impacts of climate change on groundwater in Australia: a sensitivity analysis of recharge, *Hydrogeology Journal*, Vol. 18, pp. 1625–1638
136. Mearns, L., M. Hulme, T. Carter, R. Leemans, M. Lal and P. Whetton, 2001: Climate scenario development. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*, J.T. Houghton, Y. Ding, D. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C.A. Johnson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, pp. 739-768.
137. Meehl, G.A., T.F. Stocker and Co-authors, 2007: Global climate projections. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, pp. 747-846.
138. Meixner, T. et al., 2016: Implications of projected climate change for groundwater recharge in the western United States. *Journal of Hydrology*, 534, pp. 124-138, doi:https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.027.
139. Murphy, J.M., D.M.H. Sexton, D.N. Barnett, G.S. Jones, M.J. Webb, M. Collins and D.A. Stainforth, 2004: Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations. *Nature*, 430, pp. 768-772.
140. Nakićenović, N. and R. Swart, Eds., 2000: *IPCC Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 599.
141. Oberman N. Contemporary Permafrost Degradation of Northern European Russia // *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost*. University of Alaska. Fairbanks. June 29 – July 3, 2008. Vol.2. pp.1305-1310.
142. O’Gorman, P.A., 2012: Sensitivity of tropical precipitation extremes to climate change. *Nature Geoscience*, 5(10), pp. 697-700.
143. Oki T., Kanae S. (2006), Global hydrological cycles and world water resources, *Science*, 313, pp. 1068-1072.

144. Portmann, F.T., P. Döll, S. Eisner, and M. Flörke, 2013: Impact of climate change on renewable groundwater resources: assessing the benefits of avoided greenhouse gas emissions using selected CMIP5 climate projections. *Environmental Research Letters*, 8(2), 024023, doi:10.1088/1748-9326/8/2/024023.
145. Prudhomme, C., 2006: GCM and downscaling uncertainty in modelling of current river flow: why is it important for future impacts? *Proc. 5th FRIEND World Conf.*, Havana. IAHS Publication, 308, pp. 375-381.
146. Prudhomme C., Reynard, N., Crooks, S. (2002) Downscaling of global climate models for flood frequency analysis; where are we now? *Hydrological Processes*, 16 (6). pp. 1137-1150.
147. Scibek J., Allen D.M. (2006) Modeled impacts of predicted climate change on recharge and groundwater levels. *Water Resour. Res.*, pp. 42, W11405.
148. Shamsudduha, M. and R. G. Taylor, 2019: Groundwater storage dynamics in the world's large aquifer systems from GRACE: uncertainty and role of extreme precipitation. *Earth Syst. Dynam. Discuss.*, 2019, pp. 1-36, doi:10.5194/esd-2019-43.
149. Tess A., Russo, Upmanu Lall. Depletion and response of deep groundwater to climate-induced pumping variability // *nature geoscience*. – Vol. 10 – 2017. - www.nature.com/naturegeoscience.
150. Tillman, F. D., S. Gangopadhyay and T. Pruitt, 2017: Changes in Projected Spatial and Seasonal Groundwater Recharge in the Upper Colorado River Basin. *Groundwater*, 55 (4), pp. 506-518, doi:10.1111/gwat.12507.
151. Werner, A.D., J.D. Ward, L.K. Morgan, C.T. Simmons, N.I. Robinson, and M.D. Teubner, 2012: Vulnerability indicators of sea water intrusion. *Ground Water*, 50(1), pp. 48-58.
152. Winter, J. M. et al., 2017: Representing water scarcity in future agricultural assessments. *Anthropocene*, 18, pp. 15-26, doi:https://doi.org/10.1016/j.ancene.2017.05.002.
153. Zaherpour, J. et al., 2018: Worldwide evaluation of mean and extreme runoff from six global-scale hydrological models that account for human impacts. *Environmental Research Letters*, 13 (6), 065015, doi:10.1088/1748-9326/aac547.
154. Zektser I. S., Dzyuba A. V. Submarine discharge into the Barents and White seas // *Environmental Earth Sciences* – T.71 – 2014. – No. 2 – pp. 723-729.
155. Zektser I. S., Dzyuba A. V. Uncertainties in the assessment of climate change impacts on groundwater. *Episodes*. 2015. Vol. 38, No. 1. pp. 49-53
156. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 151.

- 157.Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1535.
- 158.IPCC, 2012: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 582.
- 159.IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1535.
- 160.World water resources at the beginning of the 21st century. // Project of IHP UNESCO. Editor Shiklomanov I. A. St. Petersburg, 1996