

Исполнитель:

Некоммерческий фонд общественного  
экологического развития  
«Без рек как без рук»

Заказчик:

Общероссийская общественная организация  
по охране и защите природных ресурсов  
«Российское экологическое общество»

Основание подготовки отчета:

Договор № 147 от 24 марта 2021г. Этап №1

## Отчет

### **Многолетние изменения водного и ледотермического режима рек Онега и Северная Двина и их потенциальные изменения под воздействием изменений климата**

Исполнители:  
*Н.Л. Фролова,  
Доктор географических наук, Профессор,  
Заведующая кафедрой гидрологии суши  
Географического Факультета МГУ им. М.В. Ломоносова,  
А.А. Сазонов,  
Кандидат географических наук,  
Старший преподаватель кафедры гидрологии суши  
Географического Факультета МГУ им. М.В. Ломоносова,  
А.Н. Василенко.,  
Старший преподаватель кафедры гидрологии суши  
Географического Факультета МГУ им. М.В. Ломоносова*

Оглавление	
<b>Введение</b> .....	2
<b>Глава 1. Физико-географическая характеристика рассматриваемых бассейнов.</b> .....	4
<i>Бассейн р. Онеги</i> .....	4
<i>Климат</i> .....	5
<i>Гидрография</i> .....	5
<i>Почвенный покров и растительность</i> .....	6
<i>Геологическое строение</i> .....	6
<i>Геоморфология русла и взморья</i> .....	7
<i>Бассейн р. Северной Двины</i> .....	7
<i>Рельеф и геологическое строение бассейна</i> .....	8
<i>Рельеф и морфология устьевой области</i> .....	8
<i>Климат</i> .....	11
<i>Почвы</i> .....	12
<i>Растительность</i> .....	12
<b>Глава 2. Гидрологическая изученность рассматриваемых бассейнов.</b> .....	14
<b>Глава 3. Изученность гидрологического режима рр. Северная Двина и Онега и его изменчивости</b> .....	15
<b>Глава 4. Многолетняя изменчивость стока воды рр. Северная Двина и Онега</b> .....	18
<i>Многолетняя изменчивость стока воды р. Северная Двина</i> .....	18
<i>Внутригодовое распределение расходов воды</i> .....	20
<i>Весеннее половодье</i> .....	28
<i>Внутригодовое распределение стока р. Онега</i> .....	31
<b>Глава 5. Многолетняя изменчивость ледотермического режима рр. Северная Двина и Онега</b> .....	32
<i>Климатические особенности формирования ледотермического режима устьевых областей и бассейнов рек Онега и Северная Двина</i> .....	32
<i>Ледовый режим устьевой области р. Северная Двина</i> .....	33
<i>Термический режим устьевой области и бассейна р. Северная Двина</i> .....	35
<i>Изменения ледотермического режима устьевой области и бассейна р. Северная Двина под влиянием климатических изменений</i> .....	42
<i>Изменения ледотермического режима устьевой области и бассейна р. Онега под влиянием климатических изменений</i> .....	48
<b>Глава 6. Оценки будущих характеристик стока рр. Онега и Северная Двина</b> .....	51

Глава 7. Оценки будущих характеристик ледотермического режима рр. Онега и Северная Двина .....	55
Выводы .....	57
Список использованной литературы .....	58

### Введение

Климатические изменения последних десятилетий охватили всю географическую оболочку планеты, приводя к различным изменениям в природных системах, которые, в свою очередь оказывают сложное воздействие на хозяйственную деятельность человека.

Архангельская область – регион, исторически связанный с внутренними водными путями и Белым морем. Один из индустриальных регионов России, основу экономики которого составляют лесная промышленность, добыча полезных ископаемых, энергетика, атомное судостроение. Развитие экономики региона тесно связано с морскими портами в устьях рек, а распределение населения – с речными долинами. В связи с этим, изменения гидрологического режима при изменениях климата могут привести к комплексу последствий экономики, предположительно, в значительной мере негативных. По мнению исследователей, наиболее значимые изменения стока, связанные с изменением климата в XXI веке, будут наблюдаться именно в северных широтах [Геоэкологическое состояние..., 2007; Кислов, 2001; Мухин, 1994; Шикломанов, Шикломанова, 2003; Climate Change 2007: The Physical Science Basis, 2007]. При этом, объемы хозяйственной деятельности в бассейне Северной Двины и Онеги невелики. Она сводится к незначительным водозаборам воды на промышленные и хозяйственные нужды [Magritsky et al., 2020].

Целью проводимого исследования является оценка климатообусловленных изменений различных аспектов гидрологического режима рр. Онега и Северная Двина и прилегающих к их устьям частей Белого моря.

Задачами исследования являются:

- Анализ литературы по рассматриваемой теме;
- Статистическая оценка многолетних колебаний стока воды в низовьях рр. Онега и Северная Двина;
- Статистическая оценка многолетних колебаний температур воды и характеристик ледовых явлений в низовьях рр. Онега и Северная Двина;
- Оценка трансформаций гидрологического режима низовий рр. Онега и Северная Двина за период климатических изменений с использованием различных статистических методов;

- Оценка трансформации стока, температур воды и ледовых явлений в устьевых областях рассматриваемых рек.

Изменение гидрологического режима рек может быть связано с двумя основными группами факторов. Первая группа – естественное изменение водного режима, связанное с изменением климата, вторая – антропогенное изменение, связанное с деятельностью человека на водосборе. Отделить вклад одной группы от другой крайне сложно, поэтому в данной работе рассматривается изменение водного режима в целом, с течением времени.

Исследование выполнено с использованием современных открытых гидрологических данных, а также архивных материалов, собранных на кафедре гидрологии суши МГУ им. М.В. Ломоносова. Статистические оценки выполнены с применением MS Excel и Python. Работы выполнены старшими преподавателями Сазоновым Алексеем Александровичем и Василенко Александром Николаевичем.

## Глава 1. Физико-географическая характеристика рассматриваемых бассейнов.

### Бассейн р. Онеги.

Онега - большая река, протекающая на северо-западе России, верховья которой принадлежат Вологодской, а основное течение и большая часть бассейна - Архангельской областям. Длина реки составляет 416 км, площадь водосбора – 56,9 тыс.км<sup>2</sup>. По площади бассейна Онега занимает 3-е место среди рек Архангельской области (после Северной Двины и Мезени) (рисунок 1.1). Река берет свое начало из озера Лача, на высоте около 118 м, и впадает в Онежскую губу Белого моря.

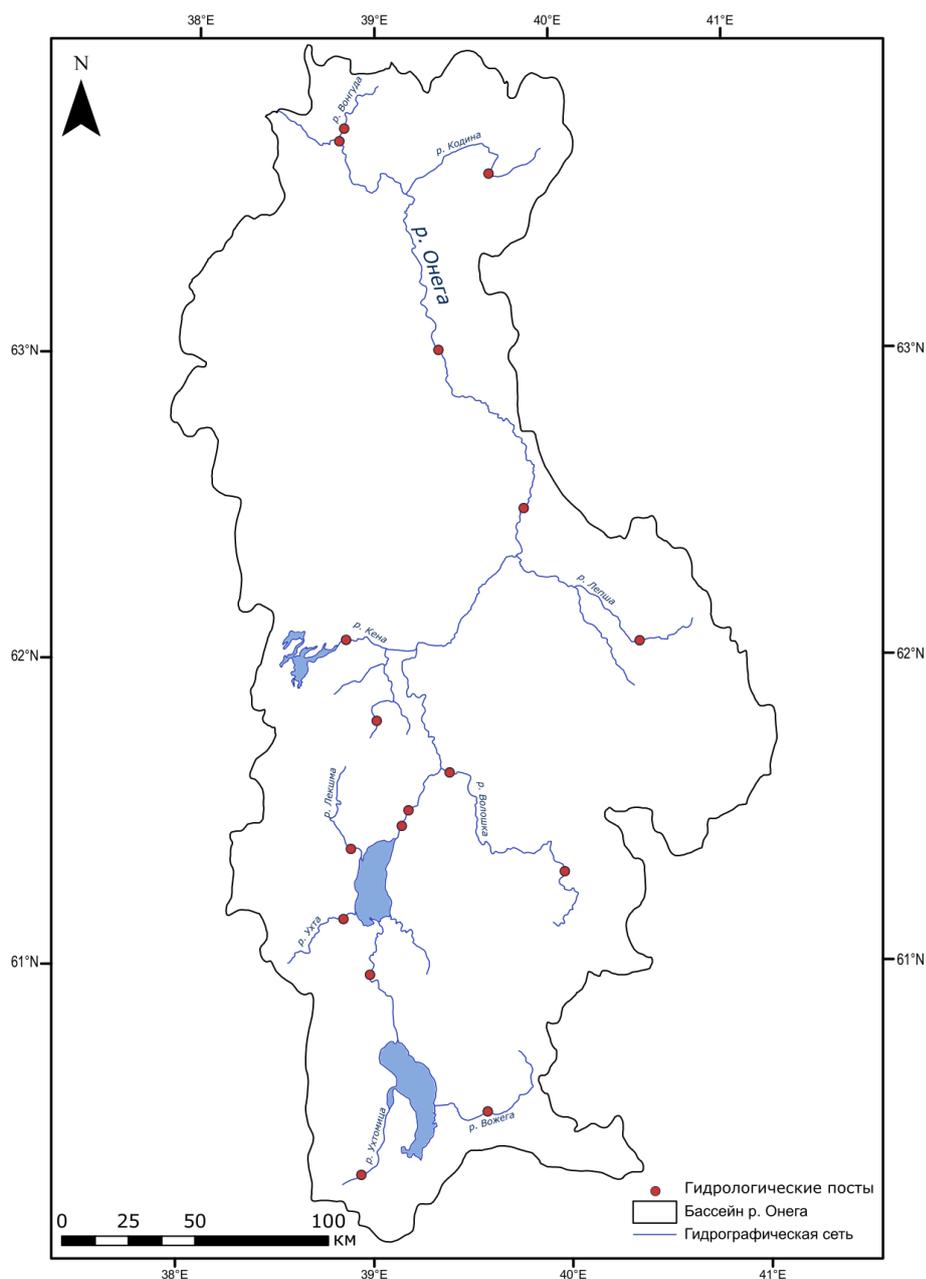


Рисунок 1.1. Схема бассейна р. Онега

Основная часть бассейна реки (91%) находится в Архангельской области, и лишь небольшой участок на юге относится к Вологодской области. На берегах реки расположены два города: Каргополь (в верхнем течении) и Онега (в устье) и несколько десятков сел. В целом регион является слабоосвоенным, хозяйственное воздействие на водные объекты также незначительно. В основном развито рыболовство, так как в озерах и реках бассейна обитает много ценных промысловых видов рыб, среди которых: лещ, судак, щука, окунь, плотва, язь, густера, налим, ерш, уклея. Наиболее активно осваиваются рыбные запасы озер (к примеру, озера Воже и Лача). Судоходство на реке возможно только на отдельных участках: длина судоходного устьевоего участка составляет около 30 км, в верхнем течении – 6 км.

### *Климат*

Климат территории – умеренно-континентальный, характеризуется коротким прохладным летом и продолжительной морозной зимой. Особенности климата определяются малым количеством солнечной радиации в зимний период, влиянием северных морей, особенно заметным в нижнем течении. Для территории характерна частая смена воздушных масс Арктики и средних широт, при общем преобладании западного переноса. Среднемесячная температура июля изменяется от 12–13°C на севере до 16–17°C на юге территории. Для большей части территории самым холодным месяцем является январь, но для северной части бассейна – это февраль. Среднемесячная температура января от -9 – -10°C, до -12 – -13°C соответственно, причем температуры в западной части бассейна на 1-2°C выше, чем в восточной. Годовые суммы осадков на большей части территории составляют в среднем около 500 мм, меняясь от 400 на северо-востоке до 750 мм на юго-западе. Распределение осадков в течении года неравномерно, большая часть выпадает в теплый период. В целом бассейна расположен в зоне избыточного увлажнения. В северной части бассейна на побережье часто образуются туманы.

### *Гидрография*

На территории бассейна реки насчитывается 4180 водотоков разных порядков, общей длиной 22,2 тыс. км и 6400 водоемов с суммарной площадью зеркала 1,9 тыс. км<sup>2</sup>. Большая часть речной сети представлена ручьями, длина которых до 10 км, их количество составляет почти 90% от общего числа водотоков. Речная сеть достаточно густая и равномерно развита на всей территории бассейна, коэффициент густоты речной сети в среднем составляет около 0,3 км/км<sup>2</sup>. Наиболее крупные правые притоки Онеги – Волошка, Моша, Мудьюга, Кодина, левые – Кена, Икса и Кожа, Поньга.

Озерность составляет около 3%, причем густота озер увеличивается на западе бассейна. 95% всех озер небольшие с площадью водного зеркала менее 0,5 км<sup>2</sup>. В верхнем

течении реки расположены два наиболее крупных озера – Воже и Лача с площадью водного зеркала 422 и 356 км<sup>2</sup> соответственно. В районах большого сосредоточения озер образуются озерно-речные системы. Достаточно крупные системы озер расположены в верховьях бассейна, одна из них (р. Совза — оз. Вещозеро — р. Модлона — оз. Воже — р. Свидь — оз. Лача) является истоком Онеги.

Заболоченность бассейна увеличивается с юга на север от 5-10 до 20% и более на низменных побережьях Белого моря. Обыкновенно это верховые, поросшие редким сосняком, а иногда и открытые моховые болота; большинство из них дают начало рекам [СКИОВО, 2014].

#### *Почвенный покров и растительность*

В целом территория бассейна характеризуется однообразием почвенного и растительного покрова, так как рельеф в основном равнинный и отсутствуют значимые изменения климатических условий и орографических границ. Средняя залесенность территории составляет 74%. Растительность представлена северо- и среднетаежными лесами, в основном распространены ельники и сосновые боры. Другие древесные породы (такие как береза, осина) встречаются только как примесь и практически не образуют чистых насаждений. Луговая растительность развита весьма незначительно и встречается только в поймах рек и свободных от леса склонах речных долин.

На исследуемой территории господствует подзолистый тип почвообразования. Почвообразующими породами являются моренные суглинки, покрывающие сплошным чехлом древние коренные породы (в основном мергели и известняки). Наиболее распространены на территории зональные почвы подзоны средней тайги - подзолистые, на Онежском полуострове наиболее развиты глеево-подзолистые почвы, на Поморском берегу и в районе озера Воже – болотные.

#### *Геологическое строение*

Бассейн р. Онеги расположен на северной окраине Восточно-Европейской равнины. Рассматриваемая территория размещается в пределах двух геоморфологических провинций: денудационно-тектонической расчлененной возвышенной равнины (кряж Ветреный пояс) и ледниковой холмистой и плоской равнины, которым в геологическом отношении соответствуют Балтийский щит и Русская плита. Современный рельеф создан, в основном, за счет накопления и перераспределения материала, принесенного ледниками, хотя основные его элементы были заложены еще в доледниковое время, когда вследствие тектонических процессов и эрозии поверхность коренных пород оказалась расчлененной на возвышенности и впадины. В формировании современного рельефа бассейна существенную роль играют карстовые процессы, распространенные в верховье и среднем

течении правобережной части бассейна [СКИОВО, 2014]. Средний уклон реки составляет 0,28‰, продольный профиль ступенчатый.

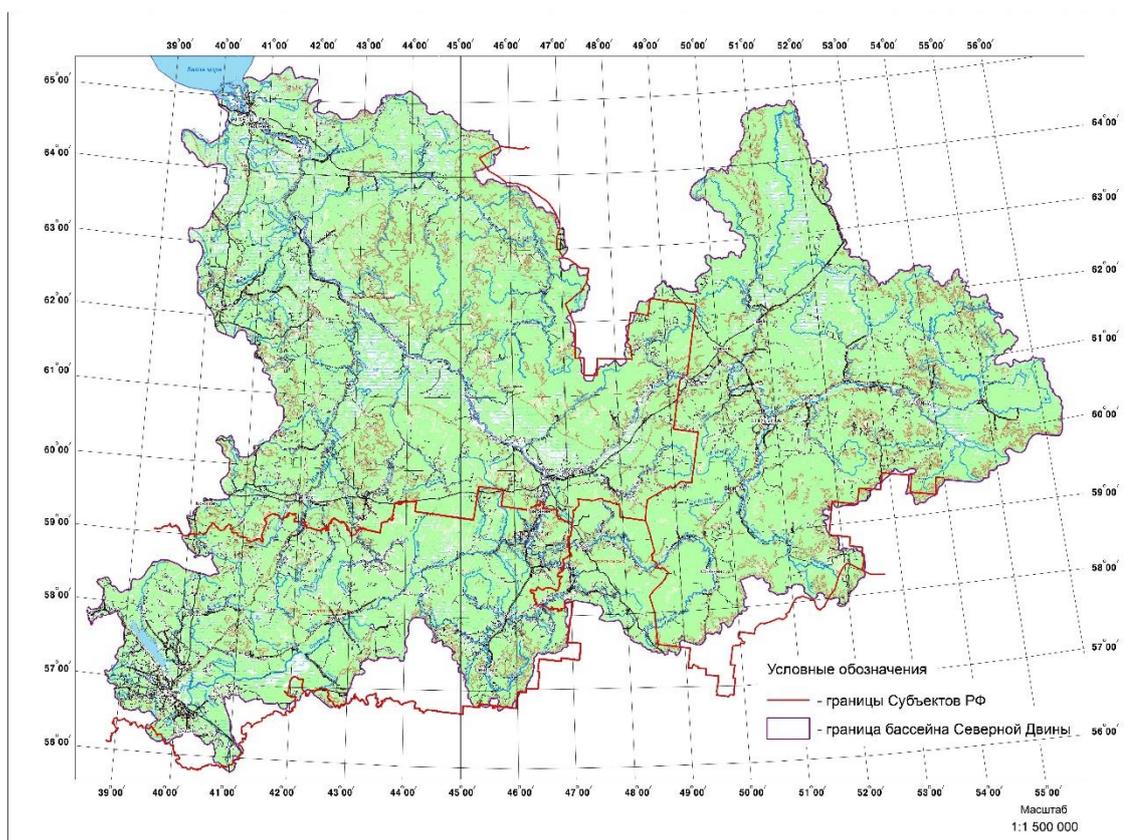
#### *Геоморфология русла и взморья*

Приливное устье р. Онега относится к безрукавному (однорукавному) с признаками устьевого эстуарного расширения. Возможное проникновение приливных волн и морских вод в устья рек связаны с эрозионно-аккумулятивной деятельностью водных потоков реки, ее основных рукавов. Предельной границей проникновения приливных волн в устье р. Онеги служат Кокоринские пороги, сформированные в 26 км от устьевого створа, где русло реки пересекает маренную грядку. Тип устьевого взморья р. Онега является открытым и отмелым. Площадь устьевого участка около 15 км<sup>2</sup> с расширением русла на выходе в Онежский залив, ширина морского края эстуария 2 км (Землянов им др., 2011). Устьевое взморье занимает мелководную часть верхней области Онежского залива и находится в пределах зоной, ограниченной изобатой 5 м с преобладающими глубинами 2-3 м. Устьевой участок реки сложен коренными породами с врезанным в них руслом. На устьевом взморье наблюдаются выходы коренных пород на поверхность, что является причиной образования о. Кий, Шоглы и др., разделяющие устьевой бар на две стоковые ложбины Карельский и Двинский фарватеры [Лупачев, 1982]. Осадочный материал на всем устьевом взморье покрывает тонким слоем сложенное кристаллическими породами мелководное плато.

#### *Бассейн р. Северной Двины*

Бассейн реки Северной Двины расположен в северной части Восточно-Европейской ледниковой аккумулятивной равнины. В административном отношении бассейн реки Северной Двины расположен в пределах 4-х субъектов Российской Федерации: Архангельской, Вологодской областей и Республики Коми, частично (3% территории бассейна) – в Кировской области. Бассейн реки Северной Двины граничит с бассейнами рек Мезени и Печоры на востоке, реки Онеги – на западе и реки Волги – на юге.

Длина реки составляет 744 км, площадь водосбора – 357 тыс.км<sup>2</sup>. По площади бассейна Северная Двина занимает 1-е место среди рек Архангельской области (рисунок 1.2). Река образуется слиянием рр. Сухона и Юг у г. Великий Устюг, впадает в Двинский залив Белого моря.



**Рисунок 1.2.** Топографическая карта бассейна р. Северная Двина

*Рельеф и геологическое строение бассейна.*

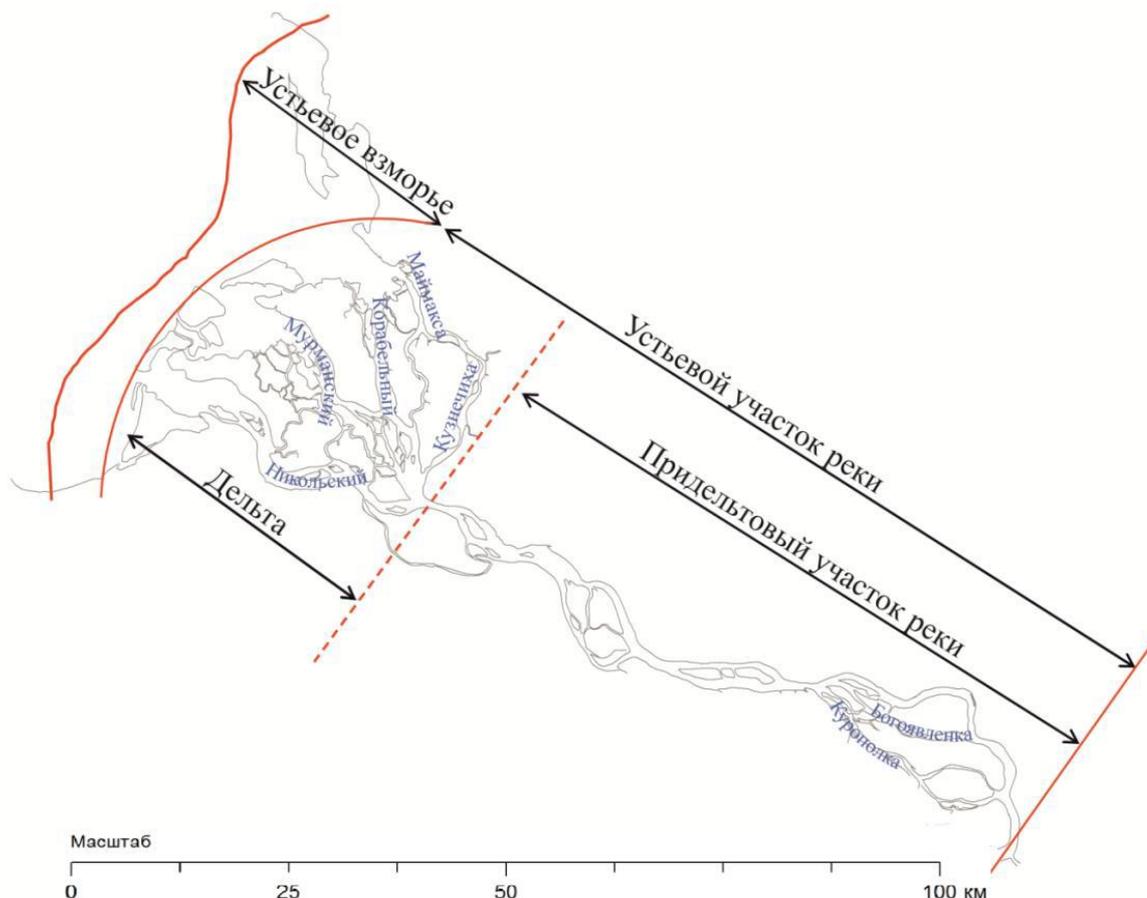
Рассматриваемая территория входит в пределы Онего-Двино-Мезенской низины. Современная поверхность впадины представляет собой плоскую, местами слабоволнистую или волнистую равнину, с абсолютной высотой поверхности 10-100 м, в которую врезаны долины р. Северной Двины и ее притоков. Наблюдается общее понижение дочетвертичной поверхности к северо-западу. Наиболее возвышенным участком считается Тиманский кряж, представляющий собой полосу гряд высотой 200-250м, расположенный на востоке территории бассейна и разделяющий бассейны рек Северной Двины и Печоры. Отдельные высоты Тиманского кряжа достигают 350 м.

Характерной геологической особенностью бассейна является развитие карста. Карстовые формы рельефа представлены воронками, суходолами и ложбинами (Архангельская и Вологодская области, республика Коми). В низовье р. Северной Двины имеются флювиогляциальные равнины, образующиеся в результате водно-ледниковой аккумуляции.

*Рельеф и морфология устьевой области.*

Устьевая область Северной Двины (рисунок 1.3) охватывает значительный участок реки длиной 135 км по фарватеру судового хода от впадения реки Пинеги до морского края

дельты (устьевой участок реки), а также юго-восточную часть Двинского залива (устьевое взморье) [Михайлов, 1997].



**Рисунок 1.3.** Районирование устьевой области р. Северная Двина [Лебедева, 2016]

Морскую границу, т.е. нижнюю границу устьевой области, принято проводить по зоне спада глубин примерно в районе изобаты 8 м. Речная граница, т.е. верхняя граница устьевой области, определяется степенью проникновения приливной и нагонной составляющих уровней воды в сторону реки при минимальном меженном расходе воды. Так как это проникновение на Северной Двине оказывается значительно дальше, чем вершина дельты, в устьевую область включается еще и значительный придельтовый участок. Принято считать, что дальность проникновения приливов и нагонов в устье Северной Двины соответствует месту впадения реки Пинеги. Хотя естественно, что эта граница является условной, и ее положение определяется как фазой гидрологического режима реки, так и высотой прилива и нагона.

Устьевое взморье относится к типу открытого приглубого взморья и занимает вершину Двинского залива [Михайлов, 1997]. Дельта Северной Двины является дельтой выдвигания на первой стадии выполнения залива [Самойлов, 1952]. Дельта имеет форму, близкую к равностороннему треугольнику со стороной 45 км. Ее площадь около 900 км<sup>2</sup>,

из которых более 55 % занимают острова и 45 % – акватория водотоков [Полонский, Лупачев, Скриптунов, 1992].

В сложной разветвленной сети водотоков дельты выделяются три главных рукава – Никольский, Мурманский и Корабельный, и две крупные протоки – Кузнечиха и Маймакса, по которой проходит большая часть основного судового хода через дельту.

Кроме того, в дельте есть еще несколько десятков второстепенных протоков, перераспределяющих сток между основными рукавами. Рукава дельты в вершине имеют ширину 1–1,5 км, а по мере приближения к морскому краю перед выходом в Двинский залив рукава сливаются и расширяются, образуя три основных устья – Пудожемское, Мурманское и Корабельное. Ширина этих устьев перед устьевым створом достигает 4–6 км. По морфологии и своей функции они представляют собой подобия эстуариев для каждого из основных рукавов. Мурманский рукав имеет так же дополнительный выход через мелководное Поганое устье, а в районе Северодвинска расположено Никольское устье, доля стока через которое совсем невелика по сравнению с остальными.

Острова дельты имеют разнообразные размеры, форму и происхождение. Все они образовались вследствие аккумулятивной деятельности моря и реки в условиях продолжающейся в течение последних пяти тысяч лет регрессии моря. Часть дельтовых островов к востоку от Корабельного рукава относится к геоморфологическому району скульптурной террасы, происхождение их связано с регрессией моря и обнажением поверхности дна древней лагуны [Гидрология устьевой области, 1965], это острова – Соломбальский, Повракульский, Бревенник и др. Морфология дельты в этой части наиболее стабильна.

В верхней половине западной части дельты происхождение островов связано преимущественно с речной аккумуляцией (острова Кего, Андриянов, Петяев и др.) активность реки здесь наибольшая, острова сложены речным аллювием. Большинство из этих островов затопливается в высокое весеннее половодье. Поверхность островов снижается по мере приближения к морю в соответствии с распластыванием и растеканием половодного стока в дельте.

Острова в нижней части дельты формируются в результате морской аккумуляции. Цепь таких молодых островов протянулась вдоль морского края дельты – острова Ягры, Гремиха, Кумбыш, Голец и др. Наиболее крупные и древние острова дельты, Никольский и Лясомин, имеют сложное происхождение. Их основу составляют песчаные дюны морского происхождения, погребенные под мощным слоем болотных массивов.

Долина реки на придельтовом участке реки хорошо разработана, имеет крутые коренные берега. В русле чередуются короткие прямолинейные участки и значительные

пойменно-русловые разветвления. Самое крупное пойменно-русловое разветвление устьевой области Северной Двины – Холмогорское: в 6 км ниже впадения реки Пинеги Северная Двина разветвляется на два крупных рукава – Быстрокурку и основной судоходный рукав, а еще через 9 км от судоходного рукава отделяется рукав Богоявленка. Долина реки в Холмогорском разветвлении расширяется до 15–16 км. Разветвление насчитывает более десятка островов, а самые крупные из них – Ухтоостров и Куростров – имеют в основе трудноразмываемые моренные холмы-останцы. Они никогда не затапливаются, представляя собой, по сути, коренные берега посередине долины, которые рукава реки вынуждены огибать [Завадский и др., 2010].

На участке от Холмогорского разветвления до дельты русло Северной Двины образует еще два крупных пойменно-русловых разветвления и одно одиночное, участки прямолинейного русла между ними имеют протяженность не более 4–5 км. В 5 км ниже Холмогорского разветвления единое русло Северной Двины разделяется на рукава Орлиха и Косковский системой из трех островов – Троицкий, Малый Троицкий и Оборшня. Эти два рукава близки по водоносности, при этом правый судоходный, Косковский, более глубокий и узкий, а левый, Орлиха, мельче и шире. На данном участке развита левобережная пойма, Косковский рукав прижимается к правому коренному берегу.

В следующем пойменно-русловом разветвлении вся пойма представлена островами, два основных рукава текут вдоль коренных берегов, что соответствует адаптированному типу русла. Левый рукав – полый Мечка, правый рукав представляет собой основное русло Северной Двины. Островной массив поймы пересекают полый Лингостровка, протока Шуя и Суетинская

#### *Климат.*

Климат территории бассейна умеренно-континентальный, с коротким прохладным летом и длительной, холодной зимой. Годовой приход суммарной солнечной радиации составляет в среднем 5122 МДж/м<sup>2</sup>.

Средняя годовая температура воздуха в бассейне реки Северной Двины увеличивается с северо-востока на юго-запад от плюс 0,4°C (м/с Сыктывкар) до плюс 2,3°C (м/с Вологда). Холодный период с температурой воздуха ниже 0°C длится более 6–7 месяцев в году (с середины октября по третью декаду апреля). Продолжительность периода со среднемесячной температурой воздуха более 10°C равна в среднем 92 дня.

Самыми холодными месяцами в году являются январь и февраль (минус 11,6°C – минус 15,6°C) с абсолютным минимумом в этот период – минус 43°C - минус 47 °C. Самый теплый месяц с относительно устойчивой температурой воздуха – июль (15,6-17,0°C) с абсолютным максимумом 34°C - 37°C.

Средняя годовая температуры поверхности почвы колеблется от плюс 1°С до плюс 3°С. Полное оттаивание почвы в северной части бассейна происходит в первой половине мая, на юге – в последних числах апреля – начале мая.

Бассейн Северной Двины относится к зоне избыточного увлажнения. Годовая норма осадков составляет 516-659 мм, в зимние месяцы выпадает от 22 до 53 мм ежемесячно, в летние (май – сентябрь) - от 43 до 82 мм. Внутрисезонное распределение осадков неравномерное: за теплый период (апрель-октябрь) выпадает 366-460 мм осадков, что соответствует 68-71% годового количества осадков, за зимний период (ноябрь-март) – 150-199 мм (29-32%).

Средняя годовая относительная влажность воздуха равна 77-80 %, минимальная величина её достигается в мае – до 63%, максимальная наблюдается в ноябре – до 89%. Среднее парциальное давление водяного пара колеблется от 6,3гПа до 7,2 гПа. Средний годовой дефицит насыщения равен 2,2 –2,7 гПа.

Средняя годовая скорость ветра по м/с Никольск равна 2,9 м/с, по м/ст Вологда - 4,2 м/с. В пределах бассейна преобладающее направление ветра в году и за зимний период юго-западное, южное, в летний период ветер неустойчивых направлений.

Средняя многолетняя величина испарения с водной поверхности увеличивается с севера на юг от 400 мм до 540 мм; средняя многолетняя величина испарения с суши меняется от 280 мм до 400 мм.

#### *Почвы.*

В почвенном покрове северо-таежной подзоны преобладают глеево-подзолистые на моренных суглинках и подзолистые иллювиально-гумусовые почвы на песках и супесях в комплексе с болотно-подзолистыми и торфяными почвами преимущественно верховых болот. В среднетаежной подзоне преобладают подзолистые и болотно-подзолистые почвы на моренных и покровных отложениях. Дерново-подзолистые почвы формируются в осветленных вырубкой и пожарами хвойных лесах, возникающих на их месте лиственных и смешанных насаждениях, а также под луговой растительностью. Во всех подзонах широко развиты болотные почвы. В поймах многочисленных рек развиты пойменные (аллювиальные) дерновые луговые и болотные почвы. Пойменные почвы лугового типа формируются в условиях затопления паводковыми водами на срок от одной-двух, до пяти-шести недель. Наиболее характерной чертой химического состава, присущей всем болотным пойменным почвам, является большое количество органических веществ.

#### *Растительность.*

Территория бассейна Северной Двины расположена в одной ботанико-географической зоне – Евроазиатской хвойно-лесной. Помимо хвойных лесов в тайге есть мелколиственные леса из березы и осины, возникшие, как правило, на месте вырубок или пожаров. Особенно много их в южной тайге.

Луговая растительность территории бассейна весьма разнообразна. В зависимости от природных условий луга делятся на суходольные, пойменные и приморские. Поймы заняты разнотравной растительностью. В прирусловой части обычны ивняки. Особое место среди лугов занимают приморские засоленные луга. Они характеризуются не только осоковыми группировками, но и широким развитием злаковых лугов.

## Глава 2. Гидрологическая изученность рассматриваемых бассейнов.

В качестве репрезентативного гидрологического поста для анализа водного режима р. Онега был выбран замыкающий пост в селе Порог, находящийся в 31 км от устья. Площадь водосбора реки Онеги в створе с. Порог составляет 55700 км<sup>2</sup>, то есть около 98% от общей площади. Данный гидрологический пост был открыт в 1912 году, однако в имеющемся доступе имеются среднемесячные данные за период весеннего половодья за 1943-2018 год, то есть за 76 лет. Среднемесячные значения за остальные фазы водного режима имеют пропуски в связи с отсутствием информации в гидрологических ежегодниках. Данные о температурах воды и ледовом режиме достаточно полные начиная с 1936 г. Полные с 1960 г.

В качестве исходных данных для анализа водного режима р. Северная Двина использовались данные наблюдений за расходом воды на замыкающем гидрологическом посту в с. Усть-Пинега. Имеющийся архив данных состоит из ежесуточных расходов воды за период с 1945 по 2018 год, то есть за 74 года наблюдений. Так как ряд наблюдений имел пропуски в отдельные годы была проведена предварительная работа по их заполнению. Гидрологический пост Усть-Пинега расположен выше вершины устьевой области р. Северная Двина, а также выше Холмогорского разветвления реки. Данные о температурах воды и ледовом режиме полные с начала XX в.

Гидрологические наблюдения непосредственно в устьевых областях рек проводятся сетью морских гидрологических станций. Данные находятся в открытом доступе [<http://esimo.ru/portal/>]

В УО р. Онеги расположены м.г.с. Онега (непосредственно в русле реки у г. Онега) и м.г.с. Ворзогоры в морской части УОР в западной её части. Наблюдения за уровнями и температурой воды на м.г.с. Онега ведутся с 1945 г. по настоящее время. Наблюдения за уровнями и температурами воды на м.г.с. Ворзогоры велись в период 1977-1987 гг.

В УО р. Северной Двины расположены сверху-вниз по судовому ходу (в скобках указаны периоды наблюдений за температурой и уровнями воды) м.г.с. Тройная гора (2009-2020 гг. с пропусками), Бакарица (1986-2003 гг.), Смольный Буян (1986-2002, 2005-2020 гг.), Соломбала (Корабельный рукав, 1900-2020 гг.), Конвейр (Корабельный рукав, 1986-1993 гг.), Мудьюг (морской край, устье Корабельного рукава, 1923-2020 гг.), Северодвинск (морской край, устье Никольского рукава, 1942-2020 гг.).

### Глава 3. Изученность гидрологического режима рр. Северная Двина и Онега и его изменчивости

Несмотря на то, что Белое море является одним из самых изученных в мире, термический режим устьевых областей больших рек, впадающих в него изучен недостаточно. Существует и ряд пробелов в изученности ледового режима устьевых областей рек.

В настоящее время относительно температурного режима устьевых областей рек Онега и Северная Двина и их бассейнов известно следующее:

- В весенне-летний период (май-июнь) температура речной воды р. Онега выше температуры воды на взморье, поэтому речной сток оказывает заметное отепляющее влияние на воды Онежского залива [Брызгалов, Никаноров и др, 2015];
- В маргинальных фильтрах рек – зонах «лавиной седиментации», где вертикальные потоки вещества в зоне смешения в сотни и даже в тысячи раз выше, чем в реке и в прилежащем море [Лисицын, 1994], наблюдаются зоны температурных градиентов поверхностного слоя моря; к примеру, летом 2004 градиент составлял  $0,5^{\circ}\text{C}/\text{км}$  [Толстиков, 2016];
- Температурный режим Онежского залива зависит от мелководности залива и пресного стока р. Онега. Мелководность и мощные приливно-отливные течения определяют изотермию всей толщи воды до глубины 35-40 м (данные экспедиции ИВПС КарНЦ РАН 2003 г.). Речной сток летом выполняет отепляющее воздействие, а турбулентное перемешивание воды такое интенсивное, что здесь отмечаются аномально высокие температуры придонных вод [Толстиков, 2016];
- Температурный режим Двинского залива сходен с температурным режимом Онежского залива [Толстиков, 2016];
- В верхних частях Онежского и Двинского заливов уже в мае температуры воды повышаются до  $+4^{\circ}\text{C}$  [Толстиков, 2016];
- Тепловой сток рек Онега и Северная Двина оценен в нескольких работах [Lammers et all, 2007; Магрицкий, 2009] по данным гидрологических постов р. Онега – д. Порог и р. Северная Двина – с. Усть-Пинега; существуют данные режимных наблюдений на этих гидрологических постах;
- Приливные колебания приводят в устьевых областях рек только к изменениям суточных амплитуд температур воды, в дельте р. Северной

Двины амплитуда в 1,5-2 раза выше, чем на замыкающем створе в с. Усть-Пинега [Ресурсы поверхностных вод. Том 3, 1972]

- Термический режим р. Онега осложняется большим количеством озер в ее бассейне и широким распространением карста.

Существует ряд проблем в оценивании термического режима рассматриваемых устьевых областей. Во-первых, данные гидрологических постов относятся к участкам выше вершин устьевых областей. Если устьевая область р. Онега заканчивается эстуарием внутри которого пространственное распределение температур воды изменяется слабо, то устьевая область р. Северная Двина оканчивается многорукавной дельтой, с множеством протоков. Значительный объем наносов р. Северная Двина приводит к заилению ряда рукавов, что приводит к повышению их температур. Таким образом, в дельте р. Северная Двина должно наблюдаться более сложное пространственно-временное распределение температур воды. Во-вторых, на больших реках может наблюдаться достаточно сложное распределение температур воды по ширине потока, что показано на примере р. Колыма авторами [Магрицкий и др,2020], показано для ряда рек европейской части СССР [Соколова, 1951] и, по сведениям сотрудников кафедры гидрологии суши МГУ им. М.В. Ломоносова, наблюдается на р. Северная Двина в период половодья.

Относительно ледового режима рассматриваемых устьевых областей и бассейнов рек известно следующее:

- Большое влияние на ледовый режим оказывает выход грунтовых вод [СКИОВО,2014];
- Наблюдения за льдом в устье р. Онега на г/п Порог имеют прерывистый характер [СКИОВО,2014];
- Существует длительный ряд (с 1881 г.) наблюдений за ледовыми явлениями на г/п р. Северная Двина – д. Усть-Пинега;
- Замерзание и вскрытие в обоих рассматриваемых устьях происходит под влиянием приливно-отливных течений;
- Замерзание и вскрытие Онежского и Двинского заливов начинается раньше, сравнительно с акваторией Белого моря;
- Для устьевой области р. Северная Двина характерно образование заторов льда в период вскрытия;
- В обоих устьевых областях естественный ледовый режим рек нарушается работой ледоколов и организацией переправ;

- Для Онежского и Двинского заливов, как и для всех крупных заливов Белого моря, характерно образование многослойных льдов у берегов;
- В последние десятилетия наблюдается смещение сроков замерзания рек рассматриваемых бассейнов на более поздние даты и сроков вскрытия на более ранние;
- Известны средние характеристики ледового режима рек за 70-е годы XX в. [Ресурсы поверхностных вод. Том 3, 1972].

Ледовый режим обеих устьевых областей изучен недостаточно. Характеризующие ледовый режим гидрологические посты расположены выше устьевых областей. Частично, данная проблема в настоящее время решается использованием космических снимков [Колий, Агафонова, 2020].

В 2017 и 2019 гг. состоялись зимний экспедиции НСО кафедры гидрологии суши МГУ им. М.В. Ломоносова, проводившие комплексные исследования устьевой области р. Онеги, в том числе – ледовой обстановки. Показано, что в относительно теплые зимы на устьевом взморье формируется полынья значительной площади.

Таким образом термический режим устьевых областей рек изучен недостаточно, что связано в первую очередь со сравнительно низким интересом к тематике температур воды в реках [Василенко, 2020]. Ледовый режим изучен лучше, что связано с его воздействием на условия навигации в портах Архангельск и Онега.

#### **Глава 4. Многолетняя изменчивость стока воды рр. Северная Двина и Онега**

##### *Многолетняя изменчивость стока воды р. Северная Двина*

На первом этапе работы, перед началом изучения водного режима реки Северная Двина, был проведен первичный статистический анализ: проверка на нормальность распределения и однородность. Причиной нарушения однородности может служить как изменение действия основных климатообразующих или антропогенных факторов. При этом должно наблюдаться тенденция к увеличению или уменьшению величины. Выявление такой неоднородности позволяет судить об изменениях климатического генезиса. Второй причиной неоднородности ряда наблюдений может служить изменение положения гидрологического поста или методики измерений.

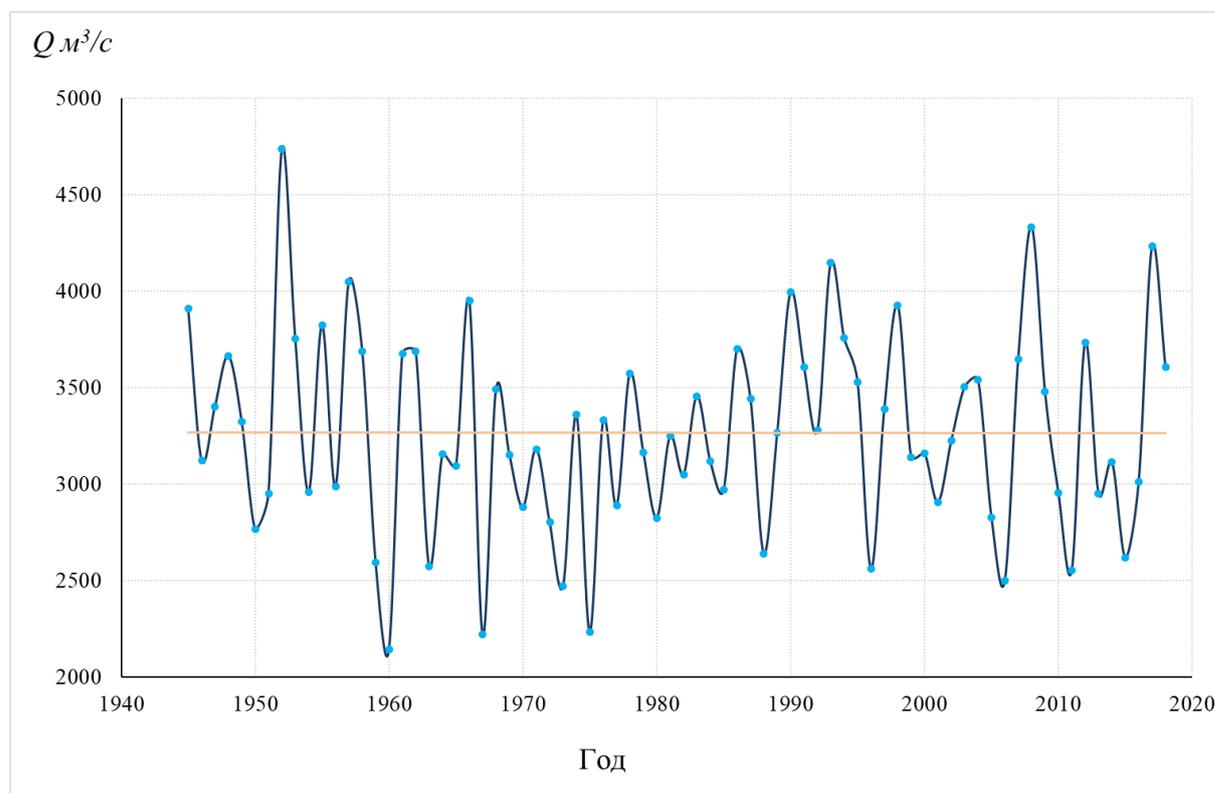
В качестве критерия проверки нулевой гипотезы о том, что выборка распределена по нормальному закону был выбран тест Лиллиефорса [Lilliefors, 1967]. Данный критерий представляет собой модификацию критерия Колмогорова-Смирнова, основное его отличие заключается в том, что изначально мы не знаем параметры нормального распределения (математического ожидания и дисперсии выборки). При уровне значимости 5% тест показал, что гипотеза о нормальном распределении принимается.

Также ряд наблюдений был проверен на нормальность с помощью еще одного эффективного критерия, применяемого в гидрологических расчетах — критерия Шапиро-Уилка [Shapiro, Wilk, 1965]. Особенностью данного теста является то, что он обладает наибольшей мощностью в сравнении с другими статистическими критериями, то есть чаще выявляет различия между распределениями в тех случаях, когда они действительно есть). При уровне значимости 5% тест, как в предыдущем случае показал, что гипотеза о нормальном распределении принимается.

На втором этапе статистического анализа была выполнена проверка данных на однородность. Так как было выявлено нормальное распределение выборки в качестве критерия на однородность был использован тест Стьюдента [Student, 1908]. Данный критерий основан на сравнение стандартных оценок и колебание величины для двух временных отрезков. Каждый ряд был разделен на две равные половины: 1945-1980 гг. и 1981 – 2018 гг. При уровне значимости 5% критерий показал, что гипотеза об однородности принимается.

Также ряд наблюдений был исследован на наличие или отсутствия тренда. Для этого был применен критерий ранговой корреляции Кенделла [Kendall, 1938]. Данный критерий является альтернативой критерию Спирмена, однако при одинаковом уровне значимости коэффициент ранговой корреляции Кенделла будет несколько меньше, чем Спирмена. Анализ ряда показал, что при уровне значимости 5% статистически значимый

тренд не выявлен. Однако, даже без применения специальных статистических критериев это видно на графике колебания среднегодовых расходов воды (рисунок 4.1)

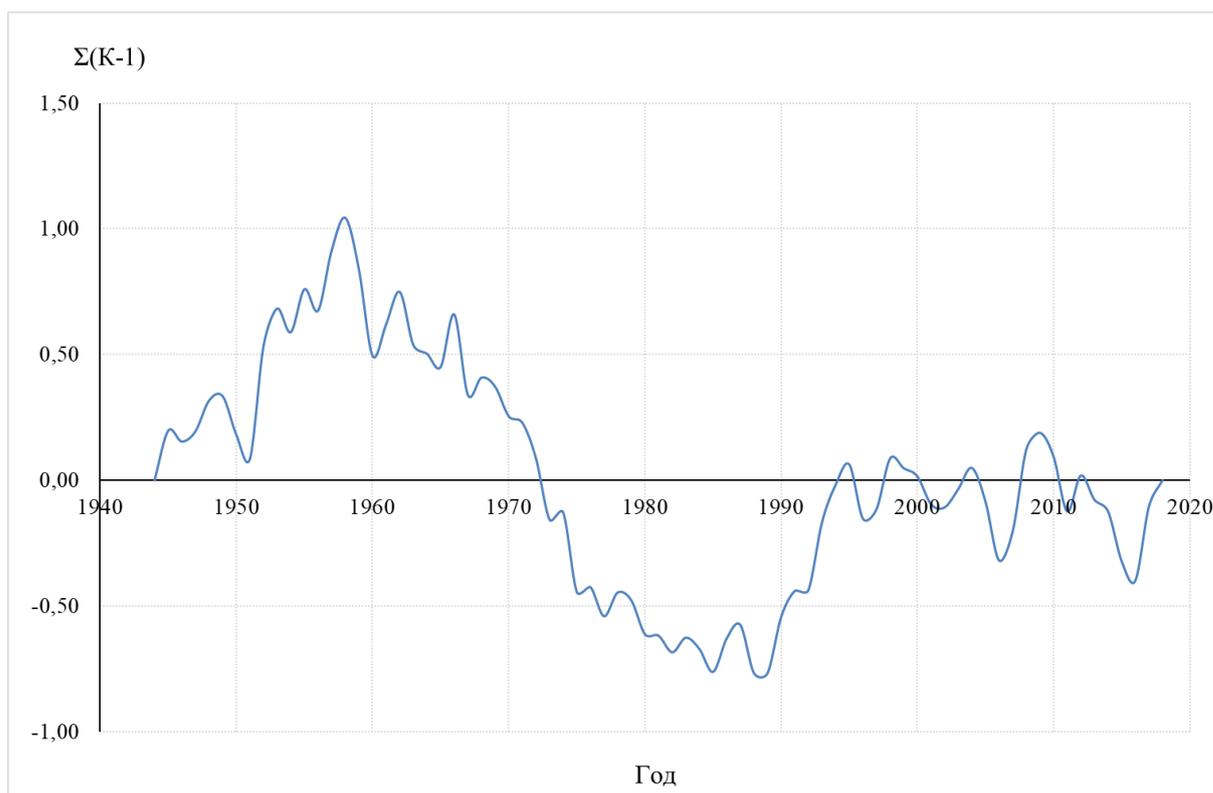


**Рисунок 4.1.** График колебания среднегодового значения расхода воды р. Северная Двина на г/п Усть-Пинега за период с 1945 по 2018 год (оранжевым цветом показана линия линейного тренда)

Среднемноголетнее значение расхода воды за период 1945-2018 гг. составляет 3265 м³/с, минимальный среднегодовой расход воды был зафиксирован в 1960 г. – 2142 м³/с, а максимальный в 1952 г. – 4733 м³/с. Квантили 25%, 50% и 75% соответственно равны: 2949 м³/с, 3235 м³/с и 3636 м³/с.

Для определения периодов повышенной и пониженной водности реки Северной Двины была построена разностная интегральная кривая (рисунок 4.2). Разностная-интегральная кривая – это кривая, представляющая собой нарастающую сумму отклонений модульных коэффициентов от среднего многолетнего значения временного ряда на конец каждого года.

Анализ разностно-интегральной кривой показал, продолжительный период пониженной водности, пришедшийся на третью четверть XX в. закончился около 1982 г., после чего начался период повышенной водности, в целом продолжающийся до наших дней.

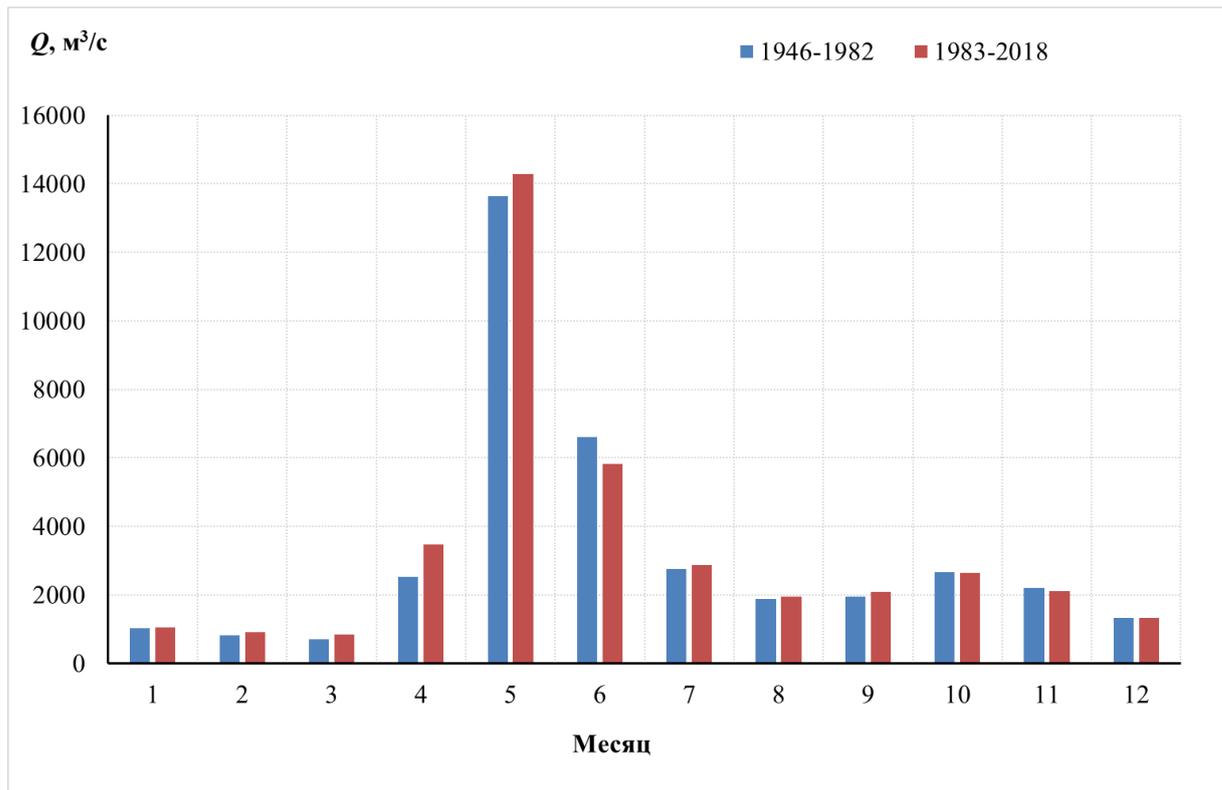


**Рисунок 4.2.** Разностно-интегральная кривая модульных коэффициентов р. Северная Двина – г/п Усть-Пинега.

*Внутригодовое распределение расходов воды.*

Водный режим реки Северной Двины отличается высоким весенним половодьем и относительно низкой меженью. Основной источник питания реки – снег, накопленный за зимний период. По классификации Зайкова река Северная Двина относится к Восточно-Европейскому типу, что видно из рисунка 4.3.

Для оценки распределения стока по сезонам были рассчитаны среднемесячные значения расхода воды за каждый водохозяйственный год за два равных периода: 1946-1982 гг. и 1983-2018 гг.



**Рисунок 4.3.** Средние месячные расходы воды р. Северная Двина – г/п Усть-Пинега за 1946-1982 и 1983-2018 гг.

Как видно на графике, существенных изменений во втором периоде по сравнению с первым не произошло. В апреле и мае произошло незначительно увеличилось среднеемесячное значение расхода воды. В июне наблюдается обратная ситуация, во второй период среднеемесячный расход воды уменьшился (таблица 4.1).

**Таблица 4.1.** Среднемесячные расходы воды р. Северная Двина – г/п Усть-Пинега за 1946-1982 и 1983-2018 гг ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) их разница (%)

Период	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1946-1982	1030	814	693,93	2532,3	13640	6608	2750	1870	1959	2670	2212	1333
1983-2018	1062	919	849,1	3466,9	14289	5813	2871	1956	2079	2640	2112	1329
Разница, %	3,15	12,8	22,363	36,911	4,756	-12	4,41	4,59	6,11	-1,1	-4,5	-0,3

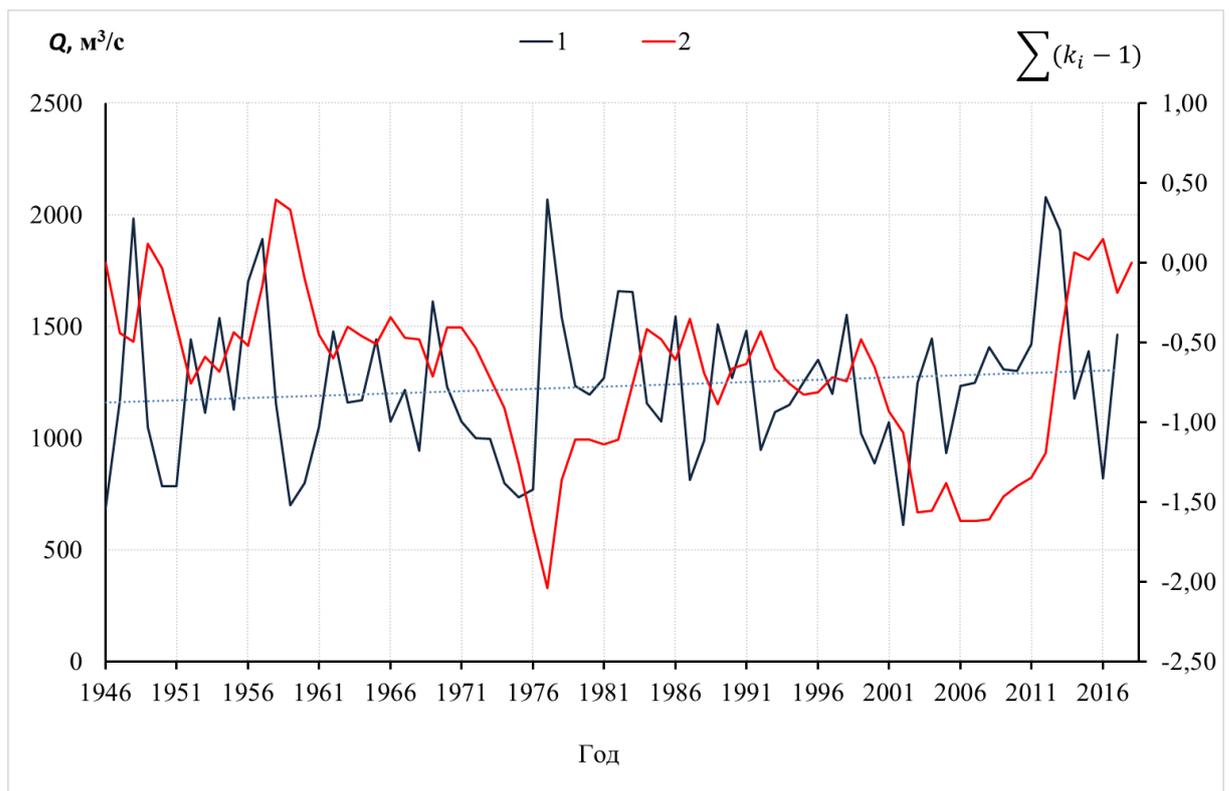
Для того чтобы статистически установить или опровергнуть наличие тренда, был проведен анализ рядов наблюдения по сезонам. Каждый год был разделен на период зимней межени (XI-III), период весеннего половодья (IV-VI) и период летне-осенней межени (VII-X).

### *Зимняя межень.*

Ряд, состоящий из среднемесячных расходов за период с ноября по март был проверен на нормальность с помощью критерия Лиллиефорса. При уровне значимости 5% гипотеза о нормальном распределении подтверждается. Так как было установлено, что данные распределены нормально имеющаяся выборка была проверена на однородность. Для этого был выполнен тест Стьюдента, в ходе которого ряд был разделен на две равные половины. При уровне значимости 5% критерий Стьюдента показал, что данные распределены однородно.

С помощью критерия Кенделла была выполнена проверка на наличие тренда. При уровне значимости 5% статистически было установлено, что тренд отсутствует.

Также для периода зимнего стока была построена разностно-интегральная кривая. На графике (рисунок 4.4) видно, что условно весь ряд наблюдений можно условно разделить на период пониженной водности до 1977 года и период повышенной водности с 1977 года по настоящее время.

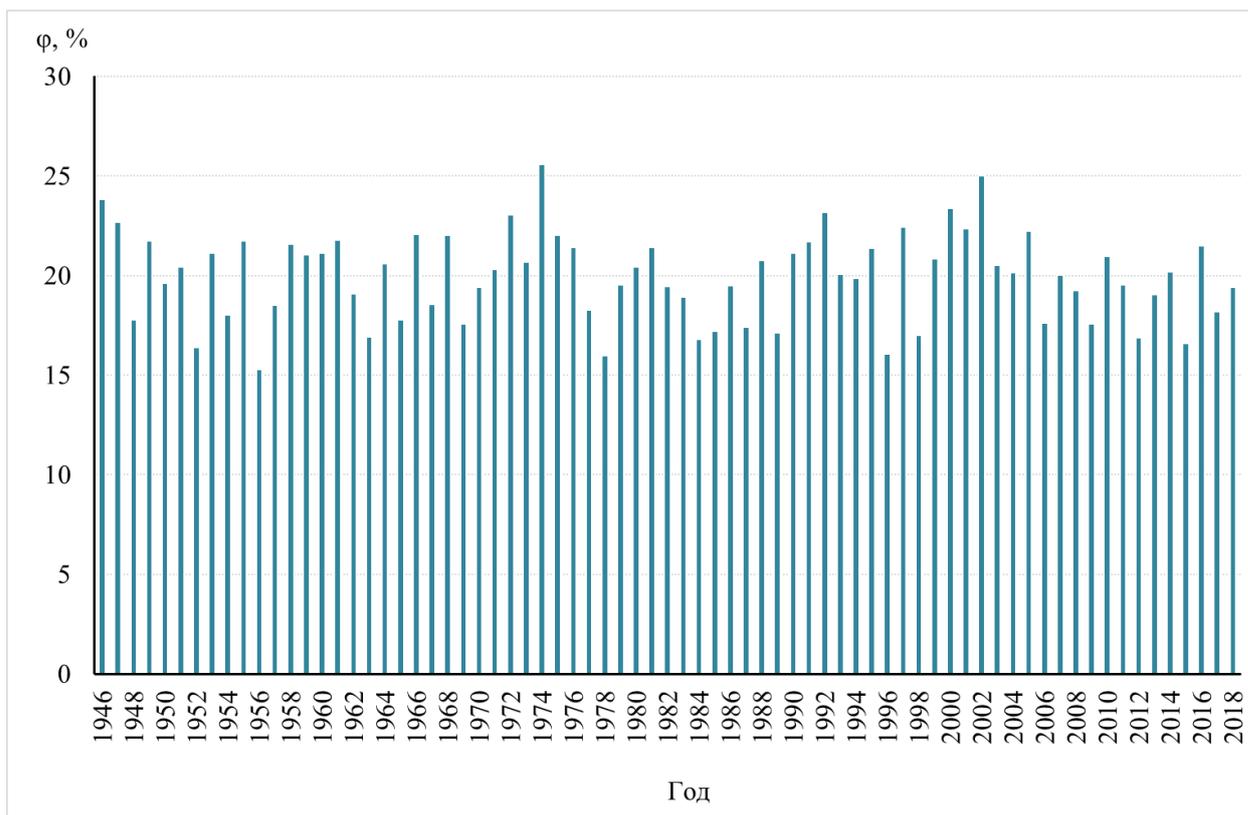


**Рисунок 4.4.** Изменение расходов воды за зимний меженный период (XI-III) р. Северная Двина – г/п Усть-Пинега за 1946-2018 гг. (1) (пунктиром показана линия линейного тренда) и разностная интегральная кривая зимнего меженного стока (2)

Среднее значение расходов воды за зимний период составляет  $1230 \text{ м}^3/\text{с}$ . Минимальное значение было зафиксировано в 2003 году, оно составило  $612 \text{ м}^3/\text{с}$ . Максимальный зимний сток был зафиксирован в 1978 году, он составил  $2067 \text{ м}^3/\text{с}$ .

### *Весеннее половодье.*

Для анализа изменений, происходящих за период весеннего стока в каждом году, был рассмотрен период с апреля по июнь, когда вне зависимости от выбранного года наблюдается половодье. Согласно проведенному анализу доля весеннего стока в среднем составляет 20%, однако в отдельные годы эта величина может составлять как 15% (1956 г.), так и 26% (рисунок 4.5)



**Рисунок 4.5.** Доля весеннего стока (IV-VI) от годового р.Северная Двина – г/пУсть-Пинега за 1946-2018 гг.

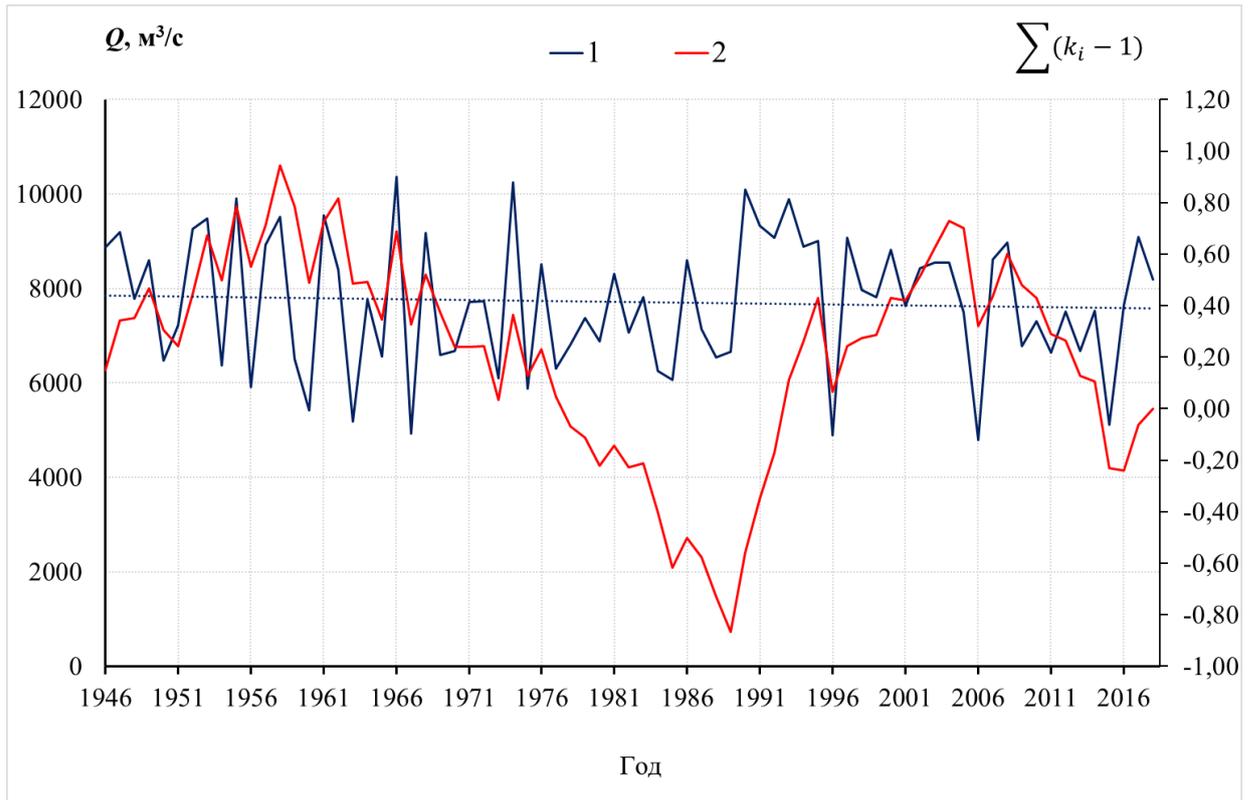
Ряд, состоящий из среднемесячных расходов за период с апреля по июнь был проверен на нормальность с помощью критерия Лиллиефорса. При уровне значимости 5% гипотеза о нормальном распределении подтверждается. Так как было установлено, что данные распределены нормально имеющаяся выборка была проверена на однородность. Для этого был выполнен тест Стьюдента, в ходе которого ряд был разделен на две равные половины. При уровне значимости 5% критерий Стюдента показал, что данные распределены однородно. С помощью критерия Кенделла была выполнена проверка на наличие тренда. При уровне значимости 5% статистически было установлено, что тренд отсутствует.

На основе имеющегося ряда наблюдений была построена разностно-интегральная кривая. На ней условно можно выделить 5 чередующихся периодов:

1. Период повышенной водности с начала наблюдений по 1958 год.

2. Период пониженной водности с 1958 года по 1989 год.
3. Период повышенной водности с 1989 года по 2004 год.
4. Период пониженной водности с 2004 года по 2016 год.
5. Период повышенной водности с 2016 года по настоящее время.

В целом можно отметить, что несмотря на чередование многоводных и маловодных периодов значительных изменений величины весеннего стока воды с течением времени не наблюдается (рисунок 4.6)



**Рисунок 4.6.** Изменение расходов воды за период весеннего половодья (IV-VI) р.Северная Двина – г/п Усть-Пинега за 1946-2018 гг. (1) (пунктиром показана линия линейного тренда) и разностная интегральная кривая стока во время половодья (2)

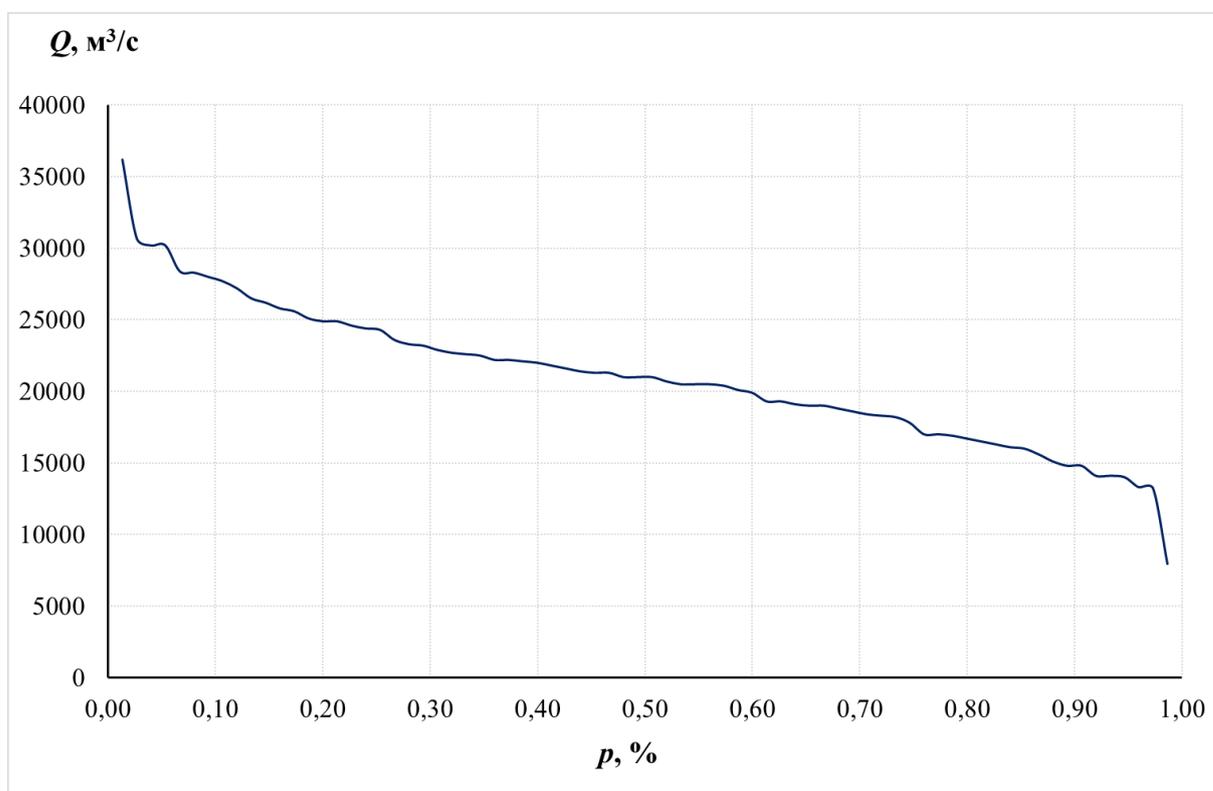
В среднем во время половодья расход воды реки Северная Двина составляет  $7712 \text{ м}^3/\text{с}$ , однако в отдельные годы он превышал  $10000 \text{ м}^3/\text{с}$  (максимальное значение наблюдалось в 1966 году, оно составило  $10373 \text{ м}^3/\text{с}$ ), а в отдельные, наоборот, средний расход воды не превышал  $5000 \text{ м}^3/\text{с}$  (минимальное значение наблюдалось в 2006 году, оно составило  $4783 \text{ м}^3/\text{с}$ ).

Помимо среднемесячных значений был проанализирован ряд наблюдений за максимальными расходами воды. В среднем максимальный расход за половодье наблюдается 9 мая, однако пик половодья может наступать в период с 5 апреля по 30 мая.

Для того, чтобы проверить имеющийся ряд на смещение сроков пика половодья, данные были предварительно проверены на нормальность и однородность. В обоих случаях при уровне значимости 5 % гипотезы подтвердились.

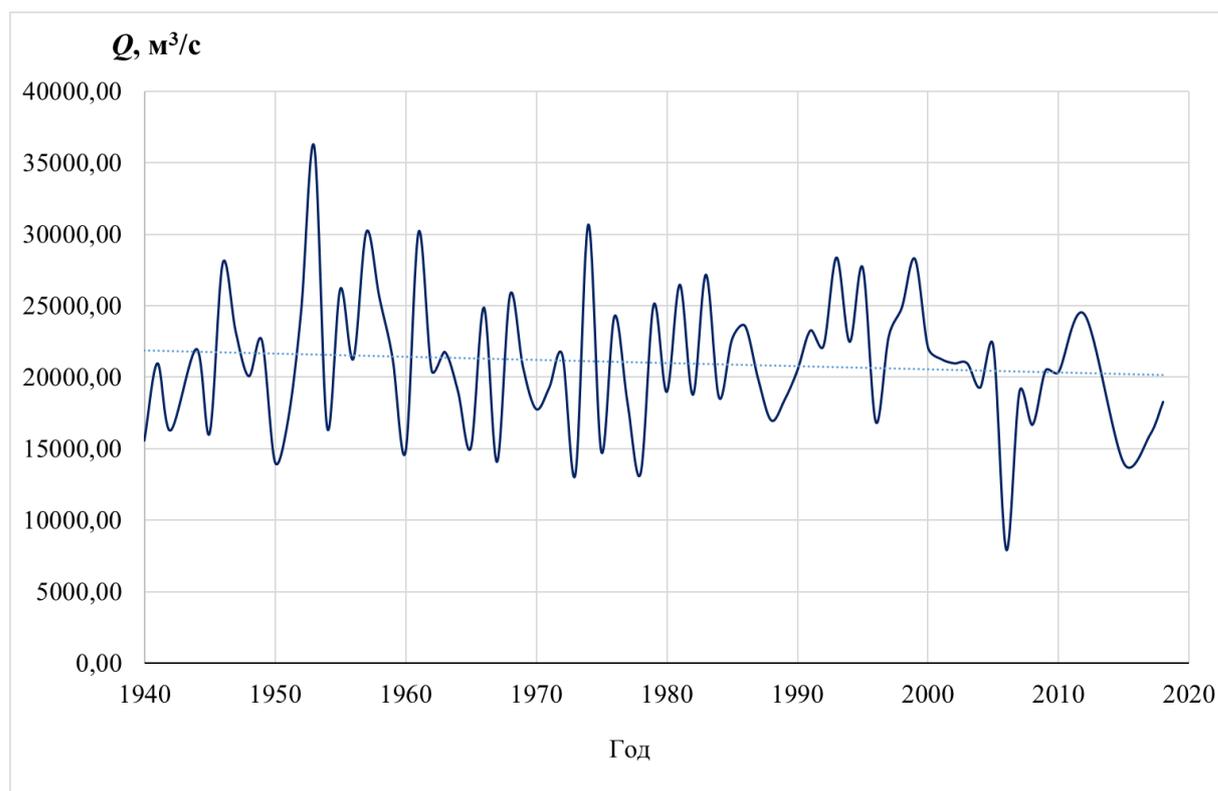
Для проверки наличия тренда, как и в предыдущих случаях был применен критерий Кенделла при уровне значимости 5%. Было статистически установлено отсутствию тренда в датах наступления максимального расхода.

На основе имеющихся данных была построена эмпирическая кривая обеспеченности максимальных расходов (рисунок 4.7). Квантили 25%, 50% и 75% соответственно равны: 24300 м<sup>3</sup>/с, 21100 м<sup>3</sup>/с и 17800 м<sup>3</sup>/с.



**Рисунок 4.7.** Эмпирическая кривая максимальных расходов воды реки Северная Двина – г/п Усть-Пинега

Среднегодовое значение максимального расхода воды составляет 21037 м<sup>3</sup>/с, однако в отдельные годы эта величина превышала 30 000 м<sup>3</sup>/с (максимальный расход воды был зафиксирован в 1953 году, он составил 36200 м<sup>3</sup>/с). Максимальные срочные расходы воды приведены на рисунке 4.8.

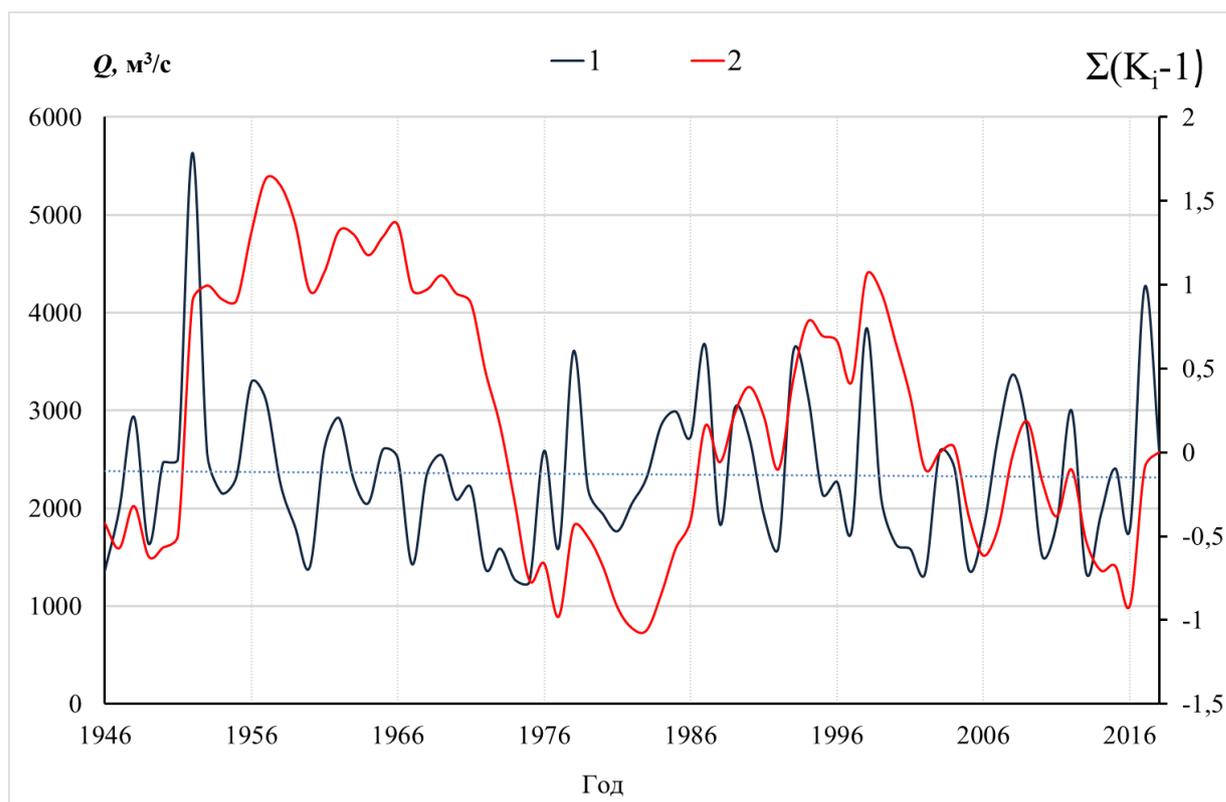


**Рисунок 4.8.** График колебания значений максимального срочного расхода воды реки Северная Двина – г/п Усть-Пинега.

#### *Летне-осенняя межень*

Для анализа возможных изменений, происходящих в период меженного стока, был рассмотрен ряд среднемесячных расходов с июля по октябрь (рисунок 4.9). С помощью статистических критериев Лиллиефорса и Стьюдента на нормальность и однородность при уровне значимости 5%, в обоих случаях тест оказался положительным. Как и в предыдущих случаях выборка была проверена на наличие тренда с помощью теста Кенделла. При 5% уровне значимости тест показал отрицательный результат.

В среднем в период летне-осенней межени расход воды составляет  $2346 \text{ м}^3/\text{с}$ . В 1975 году было зафиксировано минимальное значение –  $1253 \text{ м}^3/\text{с}$ , а в 1952 года максимальное –  $5635 \text{ м}^3/\text{с}$ . На основании имеющихся данных была построена разностно-интегральная кривая (рисунок 4.9), на которой можно выделить два периода повышенной водности: 1949-1957 гг. и 1983-1998 гг.



**Рисунок 4.9.** Изменение расходов воды за период летне-осенней межени (VII-X) р. Северная Двина – г/п Усть-Пинега за 1946-2018 гг. (1) (пунктиром показана линия линейного тренда) и разностная интегральная кривая стока во время летне-осенней межени (2)

#### Многолетняя изменчивость стока воды р. Онега.

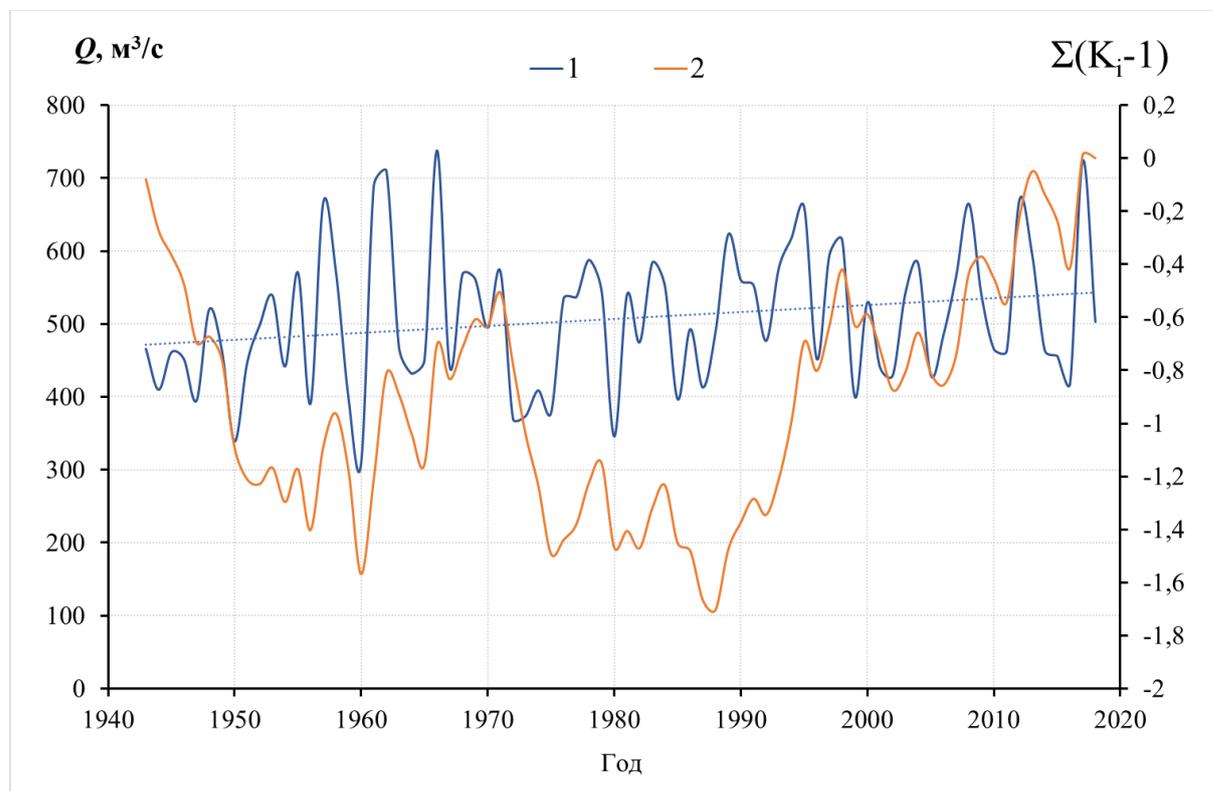
Как было отмечено выше, данные о гидрологическом режиме р. Онега в приустьевой области имеют большое количество пробелов. Первоначально был выполнен статистический анализ рядов среднемноголетнего стока воды.

Для проверки нулевой гипотезы о нормальном распределении был использован критерий Лиллиефорса. При 5% уровне значимости гипотеза подтвердилась. Так как данные распределены нормально для проверки однородности был применен тест Стюдента. При 5% уровне значимости гипотеза подтвердилась. Для того чтобы подтвердить или опровергнуть наличие тренда был использован критерий Кенделла. При 5% уровне значимости было установлено наличие положительного тренда.

Среднегодовой расход р. Онега составляет  $508 \text{ м}^3/\text{с}$ , однако от года к году эта величина варьирует от  $309 \text{ м}^3/\text{с}$  (1961 г.) до  $738 \text{ м}^3/\text{с}$  (1966 г.).

Анализ разностно-интегральных кривых средних годовых расходов воды (рисунок 4.10) показал, что для Онеги характерно чередование многоводных и маловодных

периодов. В период 1990-2018 гг. в бассейне наблюдался повышенный сток воды по сравнению со средними многолетними значениями. Годовой объем стока в нижнем створе р.Онега - г/п Порог в 1989-2008гг. составил 16,6 км<sup>3</sup>/год, что превышает среднее многолетнее значение за период 1943-1988гг. - 15,4 км<sup>3</sup>/год.



**Рисунок 4.10.** Изменение среднегодовых расходов воды половодья р. Онега – с. Порог за 1943-2018 гг. (1) (пунктиром показана линия линейного тренда) и разностная интегральная кривая среднегодовых расходов воды (2)

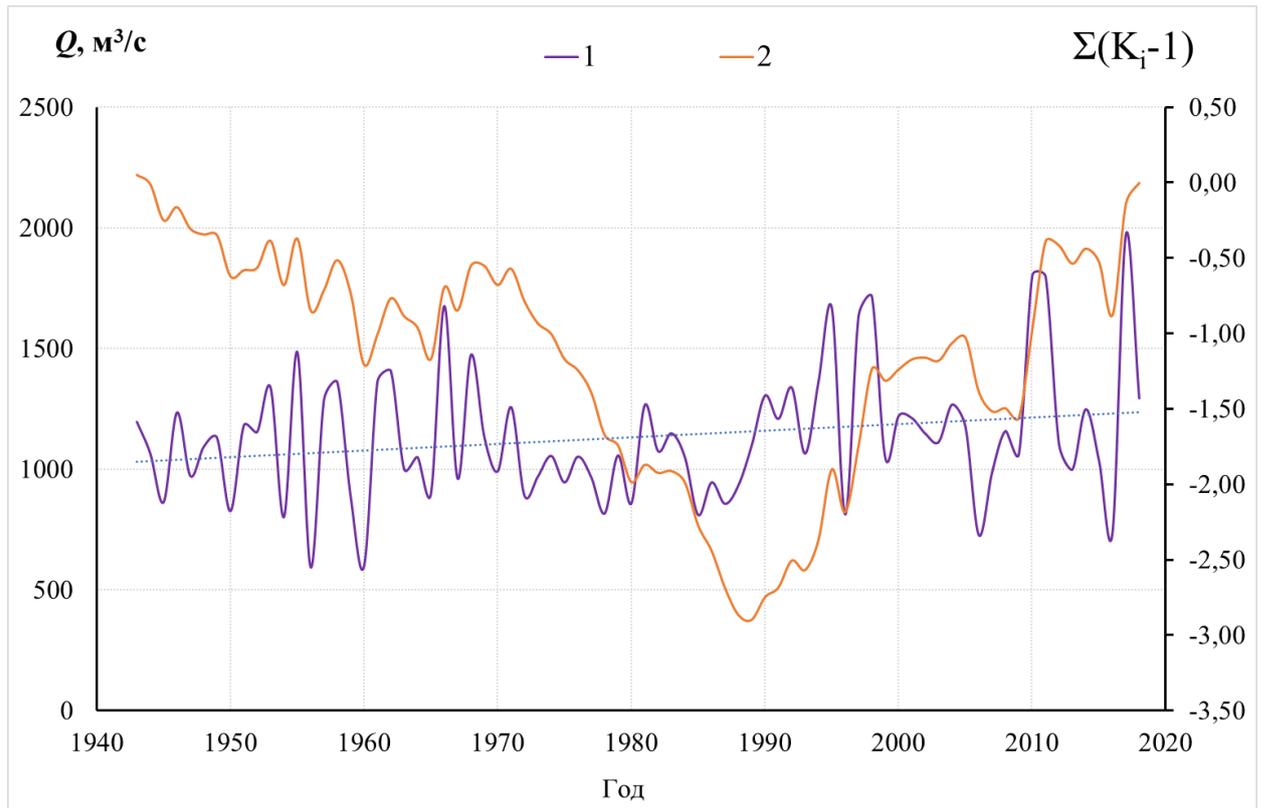
#### *Весеннее половодье.*

Весеннее половодье на Онеге начинается обычно во второй половине апреля и характеризуется интенсивным подъемом уровней, максимум которых наступает в среднем в начале мая. Спад половодья растянут в верхнем течении, что связано с регулирующим влиянием озер Воже и Лача, и более резко выражен в среднем и нижнем течении реки. Спад нарушается подъемами уровней, вызванными дождями весеннего и первой половины летнего периода.

Для проверки нулевой гипотезы о нормальном распределении был использован критерий Лиллиефорса. При 5% уровне значимости гипотеза подтвердилась. Так как данные распределены нормально для проверки однородности был применен тест Стюдента. При 5% уровне значимости гипотеза подтвердилась. Для того чтобы подтвердить или

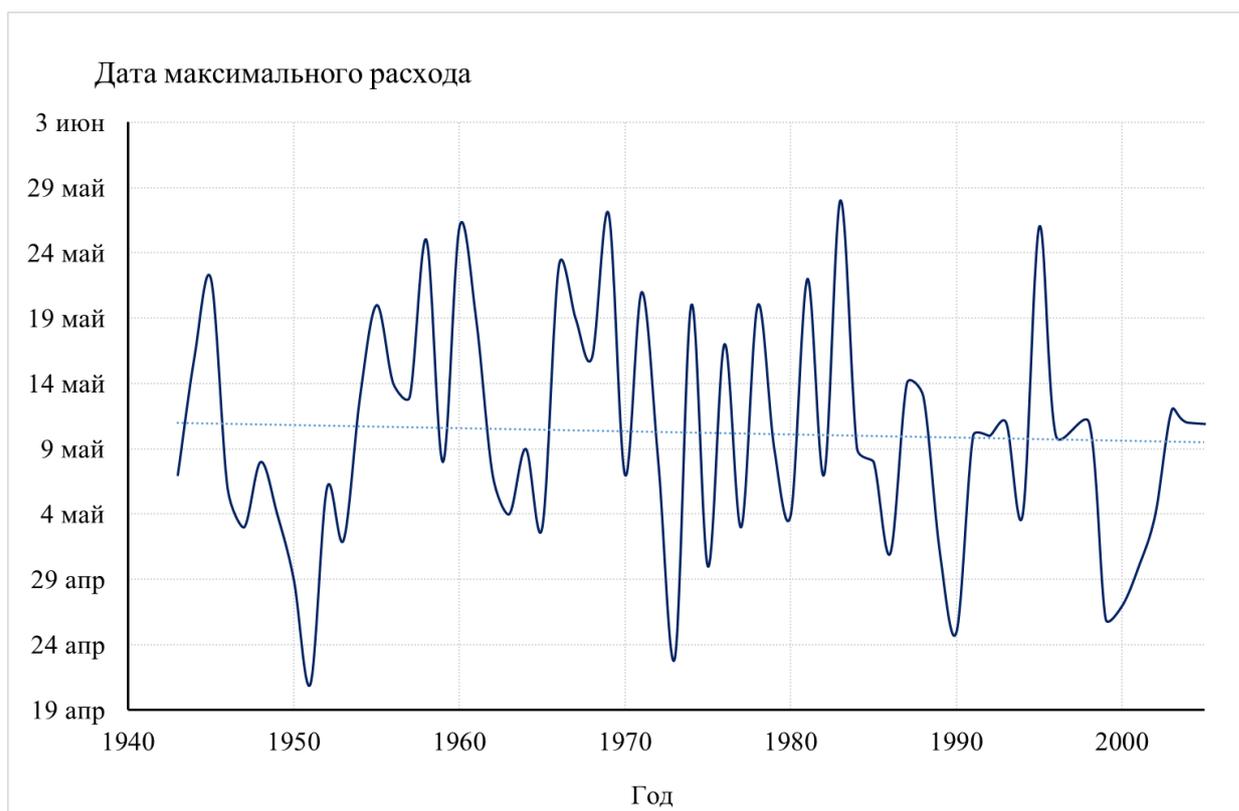
опровергнуть наличие тренда был использован критерий Кенделла. При 5% уровне значимости было установлено отсутствие тренда.

На разностно-интегральной кривой (рисунок 4.11), построенной по средним значениям расхода воды за период половодья р. Онега можно выделить период пониженной водности (1943-1989 гг.) и период повышенной водности (1989-2018 гг.). В среднем расход воды за период половодья составляет  $1134 \text{ м}^3/\text{с}$ . Минимальное среднее значение в период половодья было зафиксировано в 1956 году, оно составило  $593 \text{ м}^3/\text{с}$ , а максимальное в 2017 году –  $1971 \text{ м}^3/\text{с}$ .



**Рисунок 4.11.** Изменение расходов воды за период весеннего половодья р. Онега – с. Порог за 1943-2018 гг. (1) (пунктиром показана линия линейного тренда) и разностная интегральная кривая стока во время половодья (2)

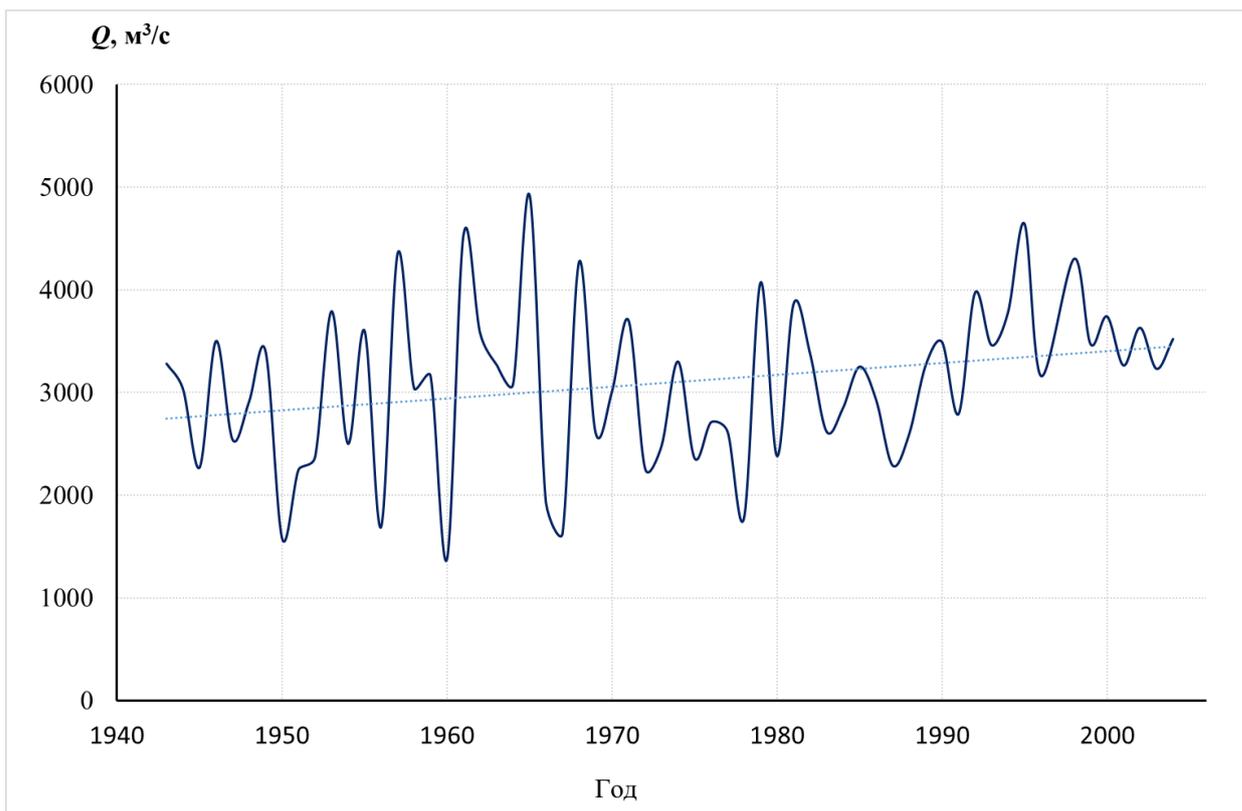
Отдельно был проанализирован ряд максимальных срочных расходов воды за период с 1943 по 2006 год (рисунок 4.12 и 4.13). В среднем максимальный расход половодья проходит 9 мая, в отдельные годы это происходило как 5 апреля (1952 г.), так и 30 мая (2006 г.).



**Рисунок 4.12.** График даты прохождения максимального срочного расхода воды р. Онега – с. Порог.

Стоит отметить, что проверка ряда наблюдений за датой прохождения максимального расхода показала, что данные распределены нормально и однородно. Проверка на наличие тренда с помощью критерия Кенделла дала отрицательный результат, таким образом смещение на более ранние или поздние даты не наблюдается.

В среднем максимальный срочный период за рассматриваемый период составляет  $3092 \text{ м}^3/\text{с}$ . Проверка на нормальное распределение и однородность максимальных расходов воды при 5% уровне значимости показало положительный результат. С помощью критерия Кенделла был обнаружен положительный тренд.



**Рисунок 4.13.** График колебания значений максимального срочного расхода воды р. Онега – с. Порог.

*Внутригодовое распределение стока р. Онега.*

Сезонное распределение стока р. Онега претерпевает изменения в связи с общими климатическими изменениями (таблица 4.2). Так доля стока половодья в годовом стоке снижается с 55% до 53%, а доля стока зимней межени повышается с 12% до 15% годового стока [Схема комплексного использования..., 2014].

**Таблица 4.2.** Внутригодовое распределение стока в р. Онега

Сезон	Зимняя межень	Половодье	Летне-осенняя межень	Год
	ХII-III	IV-VI	VII-XI	
<b>Весь период наблюдений (1943-2008)</b>				
Сток (км <sup>3</sup> )	2,0	8,7	5,3	16,0
Доля(%)	13	54	33	100
<b>1943-1988</b>				
Сток(км <sup>3</sup> )	1,8	8,5	5,2	15,5
Доля (%)	12	55	33	100
<b>Многоводный период (1989-2008)</b>				
Сток (км <sup>3</sup> )	2,5	9,1	5,5	17,1
Доля(%)	15	53	32	100

## **Глава 5. Многолетняя изменчивость ледотермического режима рр. Северная Двина и Онега**

### Климатические особенности формирования ледотермического режима устьевых областей и бассейнов рек Онега и Северная Двина

Формирование поверхностных температур воды Онежского и Двинского заливов, равно как и всего Белого моря определяется соотношением компонент теплового баланса. Сток теплоты с речными водами бассейна Белого моря формирует около 2% приходной части теплового баланса. Для сравнения – теплота ледообразования формирует около 5%. Наиболее значимыми приходными компонентами являются поглощение солнечной радиации (67%) и адвекция тепла (26%). Приток тепла с реками, таким образом, играет меньшую роль в тепловом балансе всего моря, однако для отдельных заливов и наиболее освоенных территорий его роль может быть достаточно значительной. В первую очередь, это касается различных прибрежных экосистем.

В тепловом балансе рек наибольшую роль также играет величина солнечной радиации, выражающаяся через температуру воздуха. Считается, что для масштабов времени от месяца и более температура воды определяется в первую очередь температурой воздуха. Проведенный анализ показал, что такие связи для рассматриваемых бассейнов действительно существуют, причем имеют тенденцию к усилению в летние месяцы и ослаблению в переходные сезоны. Результаты расчетов коэффициентов корреляции среднемесячных температур воды и воздуха приведены в таблице 5.1.

**Таблица 5.1.** Коэффициенты корреляции между средними месячными температурами воды и воздуха на гидрологических постах и метеорологических станциях бассейна р. Северная Двина в отдельные месяцы

Код	Река-Пост	Код метеостанции	Метеостанция	R					
				V	VI	VII	VIII	IX	X
70801	р.Северная Двина - с.Усть-Пинега	22550	Архангельск	0,74	0,82	0,89	0,8	0,83	0,82
70344	р. Пинега - с. Кулогоры			0,79	0,84	0,95	0,89	0,93	0,85
70281	р. Вага - г. Шенкурск	22768	Шенкурск	0,72	0,88	0,85	0,91	0,87	0,79

По указанным выше причинам основной единицей оценки термического режима рек в дальнейшем в этой работе будет являться средняя месячная температура воды.

Ледовый режим формируется комплексом метеорологических и гидрологических факторов. На сегодняшний день показано, что сроки наступления ледовых явлений имеют тесную связь с в первую очередь метеорологическими параметрами [Bealtos et all, 2012]. Показана тесная связь продолжительности фаз ледового режима, в первую очередь ледостава, с суммами положительных и отрицательных температур воздуха [Агафонова, 2020].

#### Ледовый режим устьевого области р. Северная Двина

Ледообразование на Северной Двине в районе г. Архангельска в среднем начинается в первой декаде ноября. В низовьях реки, на гидрологическом посту Усть-Пинега средняя дата появления льда за период 1951-2014 гг. – 28 октября. Задержка сроков появления льда в устьевой области относительно замыкающего гидрометрического створа составляет в среднем 5 суток.

Анализ данных наблюдений на ГМС Соломбала в устьевой области за последние 100 лет наблюдений [Грищенко, 2016] показывает, что наиболее ранние даты начала ледовых процессов приходятся на 17–20 октября, причем в XXI веке самое раннее ледообразование было отмечено 23 октября 2002 года (по данным до 2013 г.). Одной из причин, способствовавших формированию таких ранних сроков в предыдущие годы, были отрицательные аномалии средней месячной температуры октября, величина которых в 66 % случаев составила 2–3°C. Наиболее ранним сроком появления льда в низовьях реки является 6 октября 1977 г. В 2002 г. первый лед у с. Усть-Пинега наблюдался 21 октября.

Поздние сроки начала ледовых процессов пришлось на 22–24 ноября (1929, 1936, 1967, 2008 годы). Положительные аномалии средней месячной температуры ноября в этих случаях составили 2,4–4,4 °C. Позже всего ледообразование началось в 2005 году – 30 ноября. Средняя месячная температура воздуха в ноябре при этом была выше нормы на 6,5 °C [Грищенко, 2016]. В низовьях реки самой поздней датой появления льда является 23 ноября 2005 г. В 1967 и 2008 гг. появление льда у Усть-Пинеги произошло 21 ноября.

Установление ледостава в устьевой области также происходит в течение первой декады ноября, для низовой р. Северная Двина средней датой является 15 ноября. Средняя продолжительность замерзания у г. Архангельск составляет 2-е суток. Ранние даты установления ледостава в устьевой области мало отличаются от средней (4 ноября), при этом поздние даты могут отличаться от средней на месяц и более.

Для низовой различия как ранних, так и поздних дат значительно больше. Наиболее ранней датой установления ледостава у с. Усть-Пинега является 19 октября 1946 г. Самой поздней датой установления ледостава в устьевой области является 11 января 2012 г. Разница со средней для устьевой области составила 68 суток. Ледостав в низовьях, при этом, установился 16 ноября 2011 г. Самое позднее установление ледостава в низовьях произошло 26 декабря 2008 г. То есть после установления ледостава в устьевой области реки.

Замерзание Двинского залива начинается в последней декаде октября-ноябре. Как и для остальных заливов Белого моря для него характерно образование многослойного припая на берегах, образование торосов.

Ледостав в устьевой области в среднем продолжается 162 дня. Увеличение его продолжительности происходит в-основном при смещении сроков вскрытия на более поздние даты весной, в то время как уменьшение продолжительности происходит в-основном при смещении сроков замерзания на более поздние даты осенью [Грищенко, 2016]. Средняя продолжительность ледостава в низовьях реки – 166 суток (1951-2014 гг.) Средняя многолетняя толщина льда на р. Северной Двине в районе г. Архангельска за зимний период составляет 64 см. Нарастание льда продолжается в течение всего сезона и достигает своего максимума, как правило, к концу марта – началу апреля. Максимальные толщины льда в устье р. Северная Двина достигают 1 м. Предположительно, в отдельных рукавах дельты толщины льда могут достигать и больших значений. В период ледостава могут наблюдаться торосы и приливные трещины вдоль берегов.

Весенний ледоход на р. Северной Двине, как правило, начинается в последней декаде апреля. Средняя дата начала ледохода у с. Усть-Пинега – 25 апреля (1936-2013 гг.). К концу апреля – началу мая он проходит через Архангельск. Средняя многолетняя дата начала ледохода в районе г. Архангельска – 2 мая (1914-2013 гг.). Наиболее ранние даты вскрытия приходятся на последнюю декаду апреля в устьевой области и на середину апреля в низовьях (14 апреля 1994 г.) Ранние сроки вскрытия связаны с формированием антициклона над севером ЕТР с адвекцией теплых воздушных масс из районов Причерноморья и Казахстана. Отклонения от нормы средней месячной температуры апреля в этих случаях составляет 2-5 °С. [Грищенко, 2016]. Наиболее поздние даты разрушения

льда приходится на вторую половину мая как в устьевой области р. Северная Двина, так и в её низовьях (15 мая 1941 г.).

Очищение низовий реки ото льда происходит в среднем 8 мая (1936-2014 гг.), при самом раннем сроке – 21 апреля 1951 г., и самом позднем – 27 мая 1952 г. Средняя продолжительность очищения у с. Усть-Пинега составляет 13 суток.

Таким образом, наблюдается достаточно сложная связь между характеристиками ледового режима устьевой области и низовий реки Северная Двина, что обусловлено воздействием морских факторов в устьевой области и микроклиматических особенностей дельты.

На сроки замерзания и вскрытия в дельте помимо температуры воздуха помимо прочего влияют скорости и направления ветров. При различных их соотношениях процессы ледообразования будут происходить быстрее или медленнее, ветра северных румбов способствуют укреплению льда, южных в период вскрытия – выносу льда в море.

Естественный ледовый режим устьевой области ежегодно нарушаются работой ледоколов в весенний период, производящих «спуск» льда в моря от районов Архангельска и до устьев основных рукавов: Мурманского, Корабельного и Никольского.

В вершине Двинского залива в мае в среднем наблюдаются температуры воды около 4°C, что способствует разрушению ледяного покрова [Толстиков, 2016]. При этом часть припая может таять на берегах в виде навалов.

#### Термический режим устьевой области и бассейна р. Северная Двина

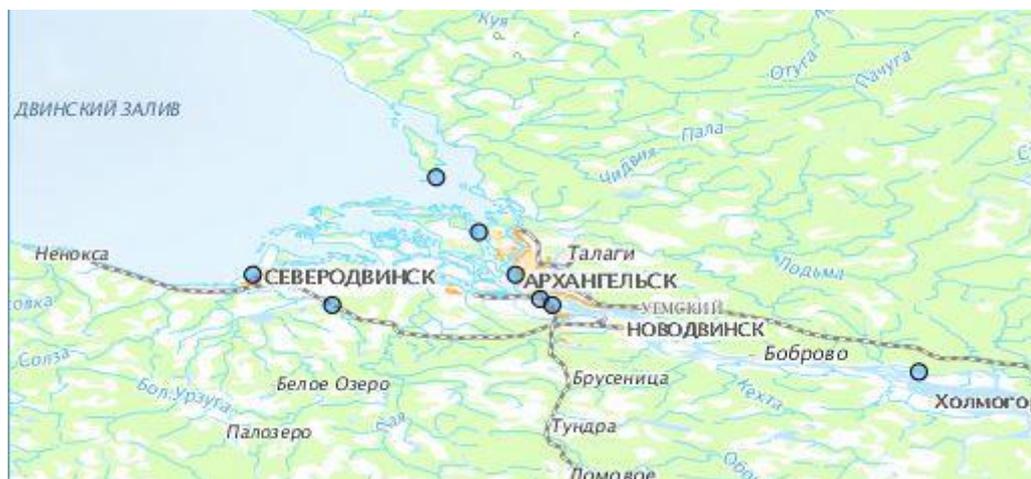
Термический режим нижнего течения р. Северная Двина характеризуется данными гидрологического поста Усть-Пинега. Сведения о термическом режиме данного участка реки приведены в таблице 5.2.

**Таблица 5.2.** Характеристики термического режима р. Северная Двина у с. Усть-Пинега (1961-2014 гг.)

Переход через 0,2°C весной	Среднемесячные температуры воды, °C								Переход через 0,2°C весной
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	
28 апреля	0,07	4,8	14,2	19,2	16,9	10,5	3,4	0,23	21 ноября

Непосредственно в дельте за почти 100 лет наблюдений было создано 7 различных пунктов наблюдений, однако проследить изменчивость температур воды за длительный период (после 1986 г.) представляется возможным по 4 пунктам: Смольный Буян (г. Архангельск до разветвления), Соломбала (г. Архангельск, начало Корабельного, восточного рукава дельты), г. Северодвинск (Никольский, западный рукав дельты) и о.

Мудьюг (выход из Корабельного рукава). Пункты Мудьюг и Северодвинск находятся на морском краю дельты и значительно остальные подвержены приливным колебаниям. Существовало и существует еще 3 пункта, позволяющие оценить внутридельтовую изменчивость температур воды: Тройная гора (район вершины дельты), Бакарица (г. Архангельск выше Смольного Буяна), Конвейер (Корабельный рукав между Соломбалой и о. Мудьюг) Взаимное расположение постов представлено на рисунке 5.1.



**Рисунок 5.1.** Взаимное расположение пунктов наблюдений за температурами воды в дельте р. Северная Двина [<http://portal.esimo.ru/>].

Наиболее изученным, таким образом, является Корабельный рукав дельты. Совершенно неизученным является Мурманский рукав. Средние температуры воды за отдельные месяцы года приведены в таблице 5.3. Для постов Усть-Пинега, Смольный Буян, Соломбала, Мудьюг и Северодвинск период осреднения составляет 1986-2014 гг., для других участков ряды короче.

**Таблица 5.3.** Средние характеристики термического режима низовий и устьевой области р. Северная Двина по данным наблюдений (1986-2014 гг.)

Месяц	Пост							
	Усть-Пинега	Тройная гора	Бакарица	Смольный Буян	Соломбала	Конвейер	Мудьюг	Северодвинск
IV	0,1		0,8	0,4	0,3	0,5	-0,1	-0,1
V	5,2	8,4	6,6	6,5	6,3	6	5,8	5
VI	15,1	16,6	15,3	15,3	15,1	15	14,8	11
VII	19,7	19,9	19	19,1	19,4	18,5	18	14,2
VIII	17	16,9	16,5	16,8	17,1	16,3	15,3	13,6
IX	10,8	11,8	11	11,2	11,4	10	10,1	10,1
X	3,9	4,1	4,4	4,6	4,7	3,9	4	5,2
XI	0,3	0,6	0,6	0,7	0,6	0,4	0,3	0,9

Как видно из таблицы 5.3 в апреле ниже с. Усть-Пинега температуры воды р. Северная Двина увеличиваются, причем, судя по другим месяцам, рост происходит ещё до входа реки в г. Архангельск. Рост составляет 0,7°C. В вершине дельты температуры воды

понижаются до в Соломбале до  $0,3^{\circ}\text{C}$ , однако к устью Корабельного рукава могут увеличиваться в пределах долей градуса. На морском крае дельты температуры воды сохраняются околонулевыми. Амплитуда температур в устьевой области составляет  $0,9^{\circ}\text{C}$ .

В мае также наблюдается рост температур воды от Усть-Пинега до Тройной горы, величина роста составляет  $3,2^{\circ}\text{C}$ . Затем температуры воды резко уменьшаются до  $6,6-6,5$  к вершине дельты и незначительно снижаются вдоль по Корабельному рукаву до  $5,8^{\circ}\text{C}$  на о. Мудьюг. Относительно вершины дельты температура воды в Никольском рукаве снижается почти на  $1,5^{\circ}\text{C}$ . При этом, в мае температуры воды на морском крае близки к речным температурам воды у с. Усть-Пинега. Амплитуда колебаний в дельте составляет  $3,4^{\circ}\text{C}$ .

В июне сохраняется тенденция повышения температур воды на участке с. Усть-Пинега – Тройная гора, с дальнейшим понижением её к вершине дельты. Внутри Корабельного рукава температуры воды изменяются мало, и они близки к температурам в с. Усть-Пинега –  $15^{\circ}\text{C}$ . Близкие значения температуры наблюдаются на о. Мудьюг –  $14,8^{\circ}\text{C}$ . При этом, в западной части дельты температуры воды на морском крае оказываются ниже –  $11^{\circ}\text{C}$ . Что говорит о значительном перераспределении тепла в реках как тепловым стоком, так и приливными и вдольбереговыми течениями с учетом антициклональной циркуляции Белого моря.

В июле температуры воды несколько растут ниже Усть-Пинеги, затем, к Бакарице температуры воды уменьшаются на величину около  $1^{\circ}\text{C}$ , в начале Корабельного рукава наблюдается небольшой рост, но к устью температура воды понижается на  $1,5$ . Тенденция более теплой восточной части морского края дельты сохраняется. Относительно Усть-Пинеги температуры воды в устье Корабельного рукава понижаются на  $1,7^{\circ}\text{C}$ , в устье Никольского рукава – на  $5,2^{\circ}\text{C}$ .

В августе от Усть-Пинеги до вершины дельты наблюдается постепенное понижение температур воды в пределах  $0,5^{\circ}\text{C}$ , затем незначительный рост и постепенное понижение к устью Корабельного рукава. Разница в температурах воды на морском крае дельты уменьшается. Относительно Усть-Пинеги температуры на о. Мудьюг понижаются на  $1,7^{\circ}\text{C}$ , в Северодвинске – на  $3,4^{\circ}\text{C}$ .

В сентябре температуры воды возрастают на  $1^{\circ}\text{C}$  на участке Усть-Пинега – Тройная гора, затем, снижаются к вершине дельты. Внутри Корабельного рукава температуры опускаются до  $10^{\circ}\text{C}$ . Температуры на морском крае составляют  $10,1^{\circ}\text{C}$ .

В октябре температуры воды растут на участке от Усть-Пинеги до вершины дельты на  $0,8^{\circ}\text{C}$ , затем снижаются в Корабельном рукаве примерно до температуры в Усть-Пинеге. При этом воды у Северодвинска становятся теплее, чем воды всей устьевой области не

менее чем на  $0,5^{\circ}\text{C}$ , что говорит о перестройке пространственного распределения температур воды в переходный сезон года.

В ноябре сохраняются тенденции октября при более низких температурах воды. Температуры воды в устье Корабельного рукава близки к таковым в Усть-Пинеге, а у Северодвинска почти в 3 раза выше.

С учётом небольших величин изменений в отдельные месяцы на отдельных участках нельзя быть полностью уверенными, что отображаемые изменения температур воды отражают именно внутриустьевую изменчивость, а не локальные особенности распределения температур воды по ширине русла с учетом возможной антропогенной нагрузки.

Рост температур воды ниже Усть-Пинеге возможно обусловлен прохождением реки через Холмогорское разветвление с лучшим прогревом воды в рукавах и возможным тепловым загрязнением от с. Холмогоры. Снижение же температур воды вниз по Корабельному рукаву скорее всего отражает именно внутридельтовые процессы формирования температур воды, по-видимому, под воздействием приливов. Наиболее яркие изменения происходят между вершиной дельты, морским краем и вершиной устьевой области. Именно на этих постах имеется наиболее полный ряд наблюдений. Трансформации температур воды за период 1986-2014 гг. внутри устьевой области отражены в таблице 5.4.

**Таблица 5.4.** Изменения температур воды внутри устьевой области в отдельные месяцы года (1986-2014 гг.)

Месяц	Участок		
	Смольный Буян - Усть- Пинега	Мудьюг - Смольный Буян	Северодвинск - Смольный Буян
IV	0,3	-0,6	-0,5
V	1,3	-0,7	-1,5
VI	-0,1	-0,3	-4,3
VII	-0,4	-1,3	-5
VIII	-0,1	-1,5	-3,2
IX	0,4	-1,1	-1,1
X	0,7	-0,7	0,5
XI	0,3	-0,4	0,3

Данная таблица подтверждает, что вершина дельты почти во все месяцы теплее, чем низовья реки у с. Усть-Пинега и практически всегда более чем на  $0,5^{\circ}\text{C}$  теплее, чем море в устьях рукавов Корабельного и Никольского. Только в октябре и ноябре море становится

теплее, чем, река в устье Никольского рукава. По-видимому, так проявляется отепляющий эффект речных вод.

Рассмотренные различия в термическом режиме морского края и вершины устьевой области показывают, что тепловой сток р. Северная Двина, вычисленный по данным гидрологического поста Усть-Пинега несколько завышается.

Термический режим большинства средних и больших рек бассейна р. Северная Двина (без учёта рр. Сухона и Юг) в целом сходен. Наблюдается достаточно быстрый период нагревания (до июля), и немного более продолжительный период остывания водных масс (июль-ноябрь). При этом охлаждение от июля к августу значительно меньше, чем к следующим месяцам. То есть, период охлаждения возможно условно разделить на 2 подпериода с медленным охлаждением (июль-август) и интенсивным охлаждением (сентябрь-ноябрь). Данные о термическом режиме (1960-2018 гг.) основных притоков р. Северная Двина представлены в таблице 5.5.

**Таблица 5.5.** Сведения о термическом режиме основных притоков р. Северная Двина (1960-2018 гг.)

Река-Пост	Средняя месячная температура воды, °С							
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Вычегда - Федяково	0,1	5,6	14,8	19,5	16,6	10,1	3,2	0,2
Вага-Шенкурск	0,6	8,3	16,3	20,1	17,0	10,3	3,8	0,4
Пинега-Кулгоры	0,1	5,1	13,9	18,3	15,3	9,1	2,9	0,2
Северная Двина - Усть-Пинега	0,1	4,8	14,2	19,2	16,9	10,5	3,4	0,2

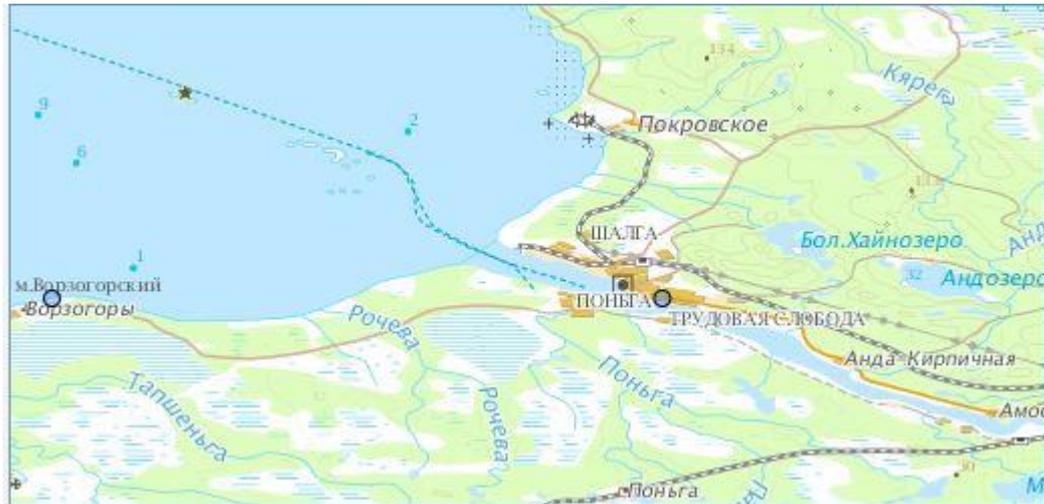
Как видно из таблицы 5.5, наиболее холодным из крупных притоков р. Северная Двина является р. Пинега, что обусловлено её северным положением, а самым теплым р. Вага. Различия в температурах воды между собой и с р. Северная Двина в замыкающем створе не превышают 2°С.

В ледовом режиме притоки характеризуются более ранним замерзанием, в силу меньшего теплосодержания водных масс, и более поздним вскрытием. Зачастую вскрытие притоков и выход ледоходов с них на акваторию р. Северная Двина происходит после прохождения основной волны ледохода. Таким образом формируются вторичные ледоходы, носящие названия рек-источников «важский», «пинежский».

Особенностью режима вскрытия всей р. Северная Двина является образование заторов, обусловленное направлением течения с юга на север, наличием большого количества излучин и достаточно мелких перекаатов, продолжительными периодами осенних шугоходов. Заторы случаются с высокой частотой, периодически сопровождаются значительными ущербами.

Ледотермический режим устьевой области р. Онега

Современные наблюдения за термическим режимом устьевой области р. Онега проводятся на морской гидрологической станции Онега в городе Онега и на гидрологическом посту р. Онега – д. Порог в вершине устьевой области. В период с 1977 по 1987 г. были проведены наблюдения на морской гидрологической станции Ворзогоры. Взаиморасположение станций показано на рисунке 5.2.



**Рисунок 5.2.** Взаимного расположение пунктов наблюдений за температурами воды в в устьевой области р. Онега [<http://portal.esimo.ru/>].

Г.М.С Онега расположена в русле реки в зоне влияния прилива, ГМС Ворзогоры находится на открытом устьевом взморье. Проведенные оценки показали, что в теплый период года (апрель-ноябрь) температуры воды на рассматриваемых станциях приблизительно одинаковы и их колебания друг относительно друга укладываются в  $0,5^{\circ}\text{C}$ . Характеристики средних месячных температур воды приведены в таблицах 5.6 и 5.7.

**Таблица 5.6.** Средние температуры воды на гидрологическом посту р. Онега – д. Порог и морской ГМС «Онега» (1960-2014 гг.)

Пункт наблюдений	Средняя месячная температура воды, $^{\circ}\text{C}$							
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
ГМС Онега	0,3	6,6	15,2	19,2	16,8	10,7	4,1	0,5
Онега-Порог	0,2	6,3	14,9	19,2	17,2	11,0	4,3	0,5

**Таблица 5.7.** Средние температуры воды на гидрологическом посту р. Онега – д. Порог и морской ГМС «Ворзогоры» (1977-1978 гг.)

Пункт наблюдений	Средняя месячная температура воды, $^{\circ}\text{C}$							
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
ГМС Ворзогоры	-0,5	6,4	14,5	18,1	16,1	10,4	3,8	-0,2
Онега-Порог	0,1	6,0	14,6	18,3	16,6	10,4	3,9	0,3

Как видно из таблиц, в мезоприливном эстуарии гидрологический пост в вершине эстуария в достаточной мере характеризует термический режим теплого периода во всем

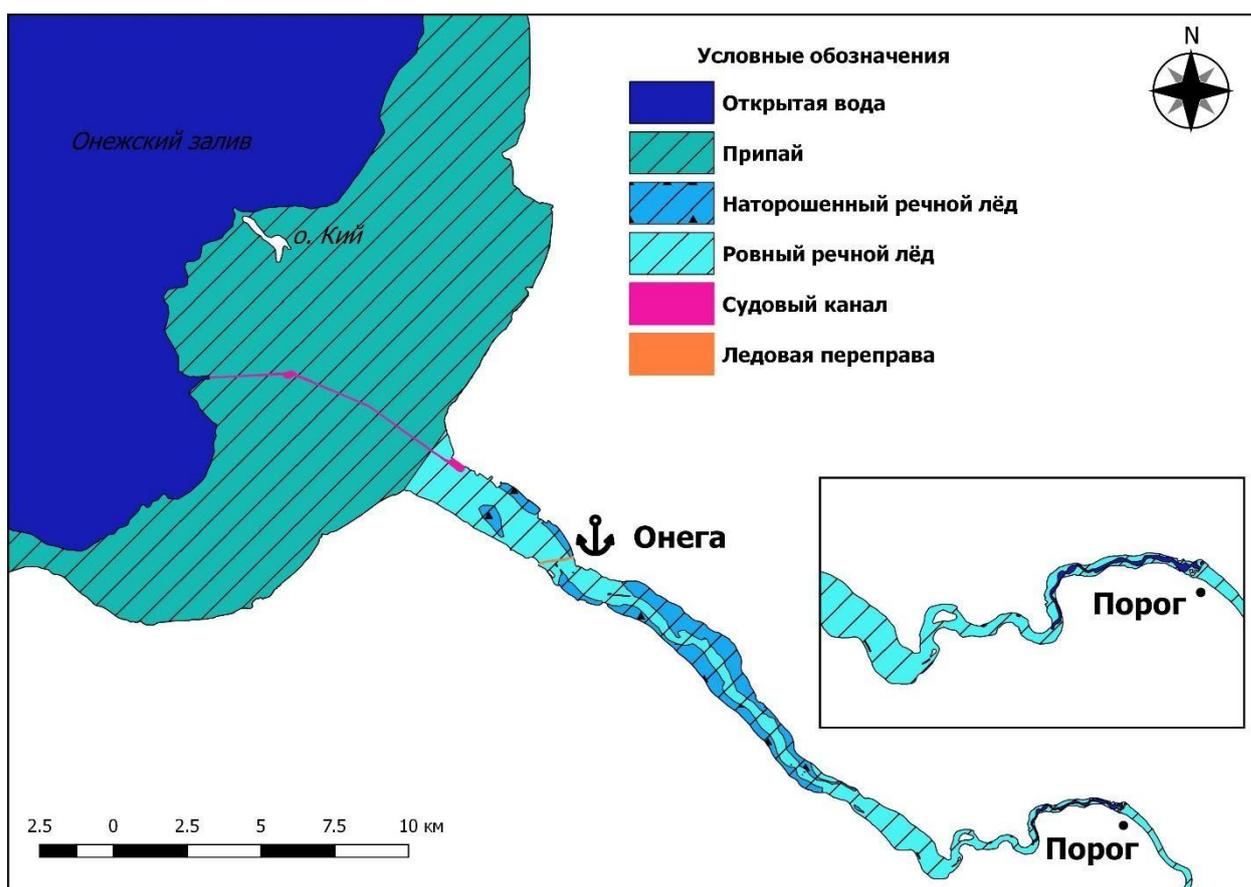
эстуарии до устьевого створа. Мористее, согласно данным ГМС Ворзогоры, уже отмечаются отрицательные температуры, свойственные для морских вод в период с ноября по апрель. Вероятно, это обусловлено снижением теплового и водного стока и интенсификацией приливно-отливных колебаний в осенний период. Непосредственно у г. Онега зимних отрицательных температур не наблюдается, что говорит о непроникновении соленых вод до г. Онега.

Полевые работы 2017 и 2019 г. позволили установить, что проникновение соленых вод в эстуарий р. Онега ограничивается первыми километрами в зависимости от сгонно-нагонных условий.

Ледяные образования появляются у д. Порог в среднем 4 ноября. Наиболее ранней датой появления льда является 14 октября 1973 г., а наиболее поздней – 11 декабря 1996 г. Установление ледостава происходит в среднем 18 ноября. Средняя продолжительность периода замерзания – 15 суток. Самое раннее установление ледостава произошло 20 октября 1946 г., а самое позднее – 22 января 2007 г. Близкие характеристики периода замерзания наблюдаются и в среднем течении р. Онеги у с. Турчасово – средняя дата появления льда – 3 ноября, установления ледостава – 16 ноября.

В связи с высокой озерностью бассейна, практически ежегодно в период замерзания наблюдаются шугоходы со средней продолжительностью от 5 (д. Турчасово) до 7 суток (д. Порог).

Продолжительность ледостава составляет в среднем 162 дня, как и в устьевой области р. Северная Двина. Продолжительность ледостава практически одинаковая по всей длине реки. Ледостав в устье характеризуется толщинами льда около 0,5-0,6 м, с небольшими торосами у берегов и небольшими приливными трещинами. Характерной особенностью всей р. Онега является наличие термических полыней (обусловленных выходами грунтовых вод). Наличие же торосов – особенность устьевой области реки. Схема ледовой обстановки на реке в 2017 г. приведена на рисунке 5.3.



**Рисунок 5.3.** Карта-схема ледовой обстановки в УО р. Онега на 05.02.2017 г.

Как видно из рисунка для Онежского залива, как и для всех беломорских заливов, характерно образование многослойного припая с небольшими торосами в морской части устьевой области.

Особенностью зимнего ледотермического режима рек бассейна р. Онега является сохранение в течение всей зимы положительных температур воды и наличие термических полыней, что обусловлено интенсивным грунтовым питанием и значительным количеством озерных рек.

Начало ледохода происходит в среднем 30 апреля у д. Порог и 27 апреля у д. Турчасово. Наиболее ранней датой начала ледохода у д. Порог является 16 апреля 1975 г., наиболее поздней – 22 мая 1941 г. У д. Турчасово, соответственно, 10 апреля 1983 г. и 19 мая 1941 г. Средняя продолжительность периода очищения ото льда составляет на р. Онеге 6-7 суток.

*Изменения ледотермического режима устьевой области и бассейна р. Северная Двина под влиянием климатических изменений.*

В низовьях р. Северная Двина в последние десятилетия наблюдаются характерные для рек ЕТР процессы смещения на более поздние даты сроков появления льда и замерзания, и на более ранние даты сроков вскрытия рек и очищения ото льда.

Ряд наблюдений за датой появления льда на гидрологическом посту р. Северная Двина д. Усть-Пинега однороден за период 1951-2014 гг. согласно непараметрическому критерию Манна-Уитни. Значимого тренда за тот же период не выявлено согласно критерию ранговой корреляции Спирмена. Уровни значимости в обоих анализах  $\alpha=0,05$ .

Изменение даты появления льда за период 1981-2014 гг. (период современных климатических условий) по сравнению с 1951-1980 гг. (базовый климатический период) составило 3 суток в сторону более поздних дат. Величина среднего квадратического отклонения сроков появления льда за 1951-2014 гг. составила 11 суток, изменений её не выявлено.

Ряд наблюдений за датой замерзания на гидрологическом посту р. Северная Двина д. Усть-Пинега однороден за период 1951-2014 гг. согласно непараметрическому критерию Манна-Уитни. Значимого тренда за тот же период не выявлено согласно критерию ранговой корреляции Спирмена. Уровни значимости в обоих анализах  $\alpha=0,05$ .

Изменение даты замерзания за период 1981-2014 гг. по сравнению с 1951-1980 гг. составило 6 суток в сторону более поздних дат. Величина среднего квадратического отклонения сроков появления льда за 1951-2014 гг. составила 13 суток, за период климатических изменений она увеличилась на 1 сутки.

Ряд наблюдений за датой начала ледохода на гидрологическом посту р. Северная Двина д. Усть-Пинега неоднороден за периоды 1951-1980 гг. и 1981-2014 гг. согласно непараметрическому критерию Манна-Уитни. За период 1951-2014 гг. выявлен значимый тренд согласно критерию ранговой корреляции Спирмена. Уровни значимости в обоих анализах  $\alpha=0,05$ .

Изменение даты начала ледохода за период 1981-2014 гг. по сравнению с 1951-1980 гг. составило 4 суток в сторону более ранних дат. Данное изменение статистически значимо. Величина среднего квадратического отклонения сроков появления льда за 1951-2014 гг. составила 6 суток, за период климатических изменений она уменьшилась на 2 суток.

Ряд наблюдений за датой очищения ото льда на гидрологическом посту р. Северная Двина д. Усть-Пинега однороден за период 1951-2014 гг. согласно непараметрическому критерию Манна-Уитни. Значимого тренда за тот же период не выявлено согласно критерию ранговой корреляции Спирмена. Уровни значимости в обоих анализах  $\alpha=0,05$ .

Изменение даты очищения ото льда за период 1981-2014 гг. по сравнению с 1951-1980 гг. составило 3 суток в сторону более ранних дат. Величина среднего квадратического отклонения сроков появления льда за 1951-2014 гг. составила 8 суток, за период климатических изменений она уменьшилась на 3-е суток.

Таким образом, в низовьях р. Северная Двина наиболее значимые изменения наблюдаются в дате начала весеннего ледохода. Продолжительность ледостава за последние 30 лет сократилась суммарно на 10 суток и в среднем составляет 161 сутки (162 суток в г. Архангельске). При этом, если за период 1936-1980 гг. минимальная продолжительность ледостава составила 143 суток, то за период 1981-2014 гг. наблюдалось 4 случая с продолжительностью ледостава меньше 143 суток в 1997, 2008, 2009, 2010 гг.

Согласно данным гидрометеорологической станции Соломбала, в дельте, в районе г. Архангельск, 71% случаев аномально коротких периодов ледостава пришелся на период после 1980 г. И если наиболее коротких ледостав у с. Усть-Пинега продолжался 132 суток (2008-2009 гг.), то в г. Архангельске самый короткий ледостав продолжался 101 сутки (2011-2012 гг.). Короткие периоды ледостава в XXI в. обусловлены очень крупными температурными аномалиями в ноябре (до 3-6,5°C) и декабре (7-8°C) по метеостанции Архангельск [Грищенко, 2016].

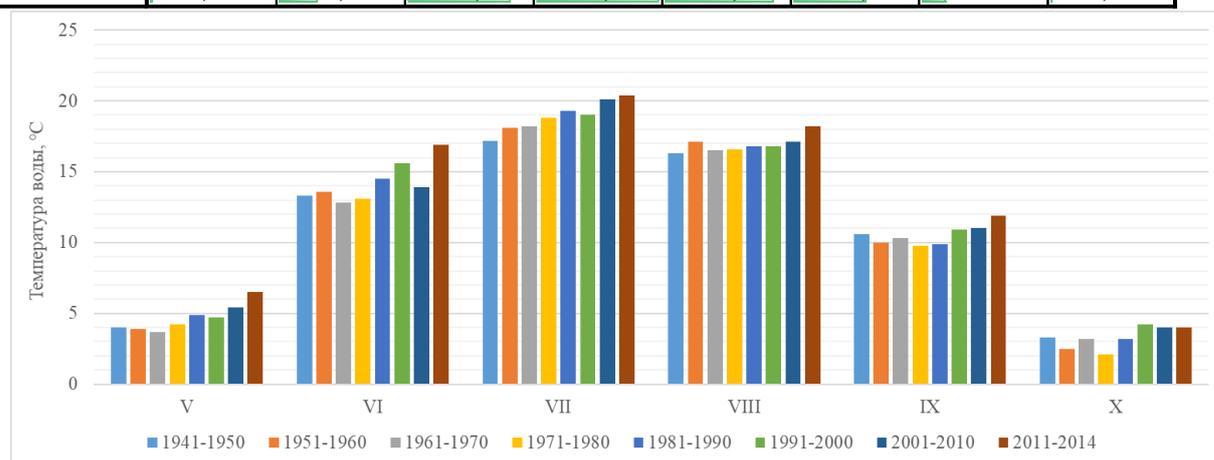
Анализ исторического материала 1733-1855 гг. показывает, что вскрытие р. Северной Двины в районе г. Архангельска происходило в сроки более поздние по сравнению с XX–XXI веками. Средней многолетней датой вскрытия реки было 13 мая. В этот период, который характеризуется как малая ледниковая эпоха, нередко в июне выпадал снег. Самая поздняя дата начала ледохода в Архангельске приходится на 7 июня 1814 года, когда в летописях в Архангельске отмечалась «необычайно морозная зима. Необычайно поздняя весна» [Грищенко, 2016].

Анализ среднемесячных температур воды на гидрологическом посту Усть-Пинега показал, что в период с апреля по июль, а также в сентябре и октябре статистически значимые тренды (по Спирмену) наблюдаются в период 1960-2018 гг. При этом статистически значимых трендов в периоды 1961-1990 гг. (базовый климатический период) и 1991-2018 гг. (современный климатический период) не выявлено. В августе выявлены статистически значимый тренд температур воды в период 1991-2018 гг. В ноябре выявлены статистически значимые тренды в периоды 1960-2018 гг. и 1981-2010 гг. При этом, статистически значимого тренда в 1991-2018 гг. не выявлено. Значимость трендов проверялась при уровне значимости  $\alpha=0,05$ .

В таблице 5.8 представлены средние температуры воды на гидрологическом посту Усть-Пинега за отдельные десятилетия XX и XXI вв., на рисунке 5.4 приведена их визуализация.

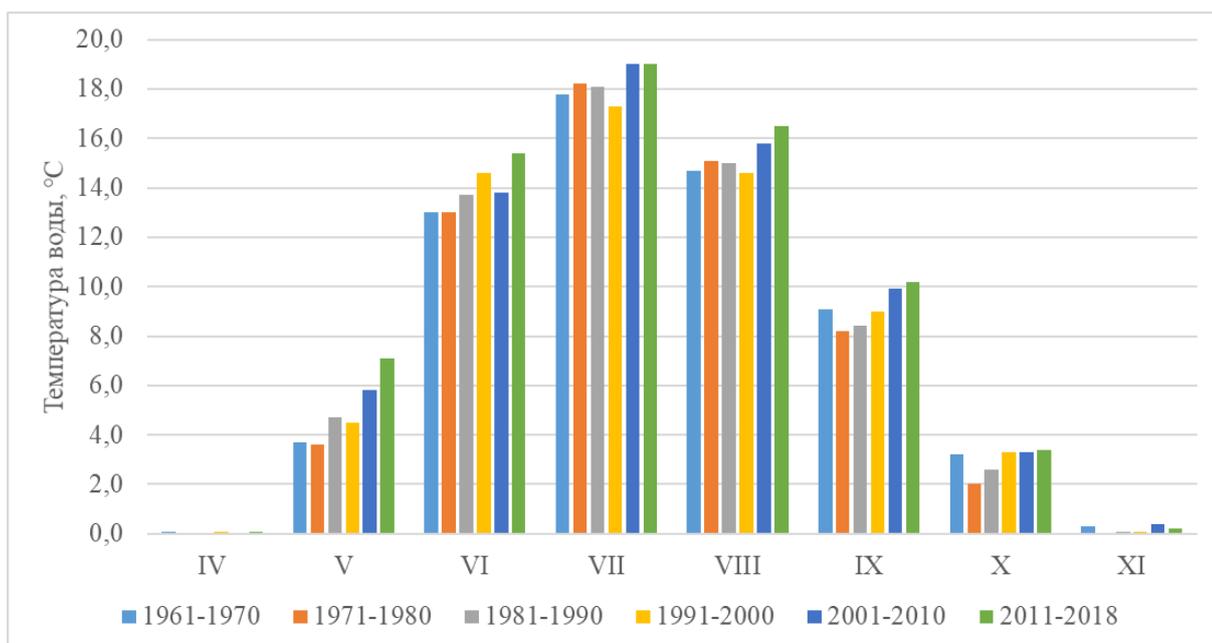
**Таблица 5.8.** Средние температуры воды за декады XX и XXI вв. на гидрологическом посту р. Северная Двина – с. Усть-Пинега

Декада	Месяц							
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
1941-1950	0,09	4	13,3	17,2	16,3	10,6	3,3	0,12
1951-1960	0,13	3,9	13,6	18,1	17,1	10	2,5	0,12
1961-1970	0,03	3,7	12,8	18,2	16,5	10,3	3,2	0,37
1971-1980	0,04	4,2	13,1	18,8	16,6	9,8	2,1	0,01
1981-1990	0,08	4,9	14,5	19,3	16,8	9,9	3,2	0,13
1991-2000	0,11	4,7	15,6	19	16,8	10,9	4,2	0,2
2001-2010	0,09	5,4	13,9	20,1	17,1	11	4	0,47
2011-2014	0,18	6,5	16,9	20,4	18,2	11,9	4	0,25

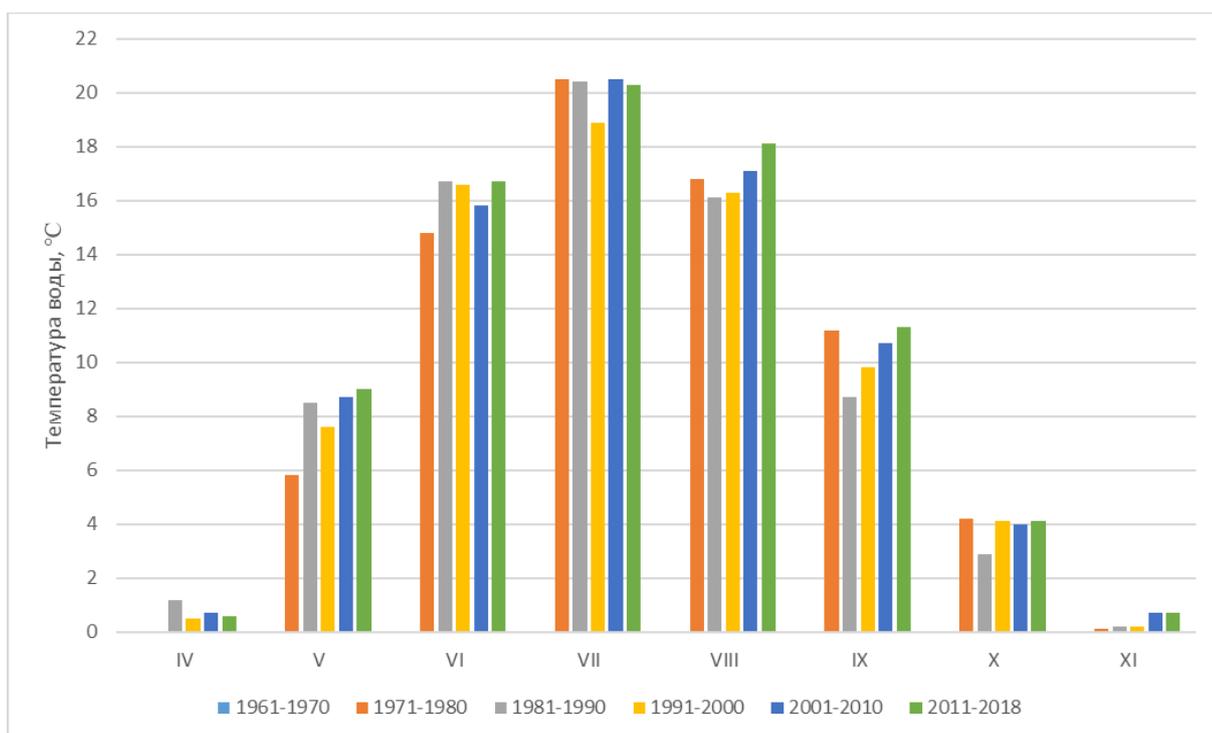


**Рисунок 5.4.** Средние температуры воды за декады XX и XXI вв. на гидрологическом посту р. Северная Двина – с. Усть-Пинега

Рисунок и таблица отражают тенденции роста температур воды в низовьях р. Северная Двина во все теплые месяцы года. Обращает на себя внимание рост температур воды в последние десятилетия XX в. и, в большинстве случаев, в первые десятилетия XXI в. Особенно заметен рост температур воды в последние декады в мае, июне, августе и сентябре – то есть в переходные сезоны. Разница температур воды с предыдущими декадами может достигать 1-2°C. Обращает на себя внимание также некоторая цикличность, в особенности – в ноябре и июне. На реках с меньшей площадью водосбора эти тенденции выражены даже более ярко, что отражено на рисунках 5.5 и 5.6.



**Рисунок 5.5.** Средние температуры воды за декады XX и XXI вв. на гидрологическом посту р. Пинега – с. Кулогоры



**Рисунок 5.6.** Средние температуры воды за декады XX и XXI вв. на гидрологическом посту р. Вага – г. Шенкурск

Средние месячные температуры воды за периоды 1961-1990 и 1991-2014 гг., а также разница средних величин за эти периоды на гидрологических постах бассейна р. Северная Двина приведены в таблицах 5.9, 5.10 и 5.11.

**Таблица 5.9.** Среднемесячные температуры воды за периоды 1961-1990 гг. и 1991-2014 гг. и изменения среднемесячных температур воды за эти периоды по гидрологическому посту р. Северная Двина – с. Усть-Пинега

Период	Среднемесячная температура воды, °С							
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
1961-1990	0,05	4,3	13,5	18,8	16,6	10	2,9	0,17
1991-2014	0,11	5,3	15,1	19,7	17,2	11,1	4,1	0,32
Изменения, °С	0,06	1	1,6	0,9	0,6	1,1	1,2	0,15

**Таблица 5.10.** Среднемесячные температуры воды за периоды 1961-1990 гг. и 1991-2018 гг. и изменения среднемесячных температур воды за эти периоды по гидрологическому посту р. Пинега – с. Кулогоры

Период	Среднемесячная температура воды, °С							
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
1961-1990	0,1	4,1	13,3	18,1	14,9	8,5	2,6	0,1
1991-2018	0,1	5,7	14,5	18,5	15,6	9,5	3,2	0,2
Изменения, °С	0	1,6	1,2	0,4	0,7	1	0,6	0,1

**Таблица 5.11.** Среднемесячные температуры воды за периоды 1961-1990 гг. и 1991-2018 гг. и изменения среднемесячных температур воды за эти периоды по гидрологическому посту р. Вычегда – с. Федяково

Период	Среднемесячная температура воды, °С							
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
1961-1990	0,2	4,8	13,9	19	16	9,4	2	0
1991-2018	0,1	6	15,3	19,8	16,9	10,2	3,7	0,2
Изменения, °С	-0,1	1,2	1,4	0,8	0,9	0,8	1,7	0,2

Таблицы 5.9-5.11 также отражают наименьшие изменения температур воды в июле и августе, сравнительно с переходными месяцами. Особенно обращает на себя внимание постепенный рост температур воды в апреле и ноябре, в месяцы, в которых наблюдается смещение сроков ледовых явлений на более ранние и более поздние соответственно, в первую очередь это проявляется на самой большой из рассматриваемых рек. На реках с меньшими площадями бассейнов в апреле изменения минимальны, иногда отрицательны в пределах погрешности измерений.

Современный тепловой сток р. Северная Двина имеет тенденцию к увеличению. Причем, большая часть увеличения достигается за счет периода половодья – мая. В настоящее время, при этом, показано, что в период половодья тепловой сток в большей степени определяется температурой воды, определяемой большей частью температурой

воздуха [Василенко и др, 2020]. Характеристики теплового стока р. Северная Двина приведены в таблице 5.12.

**Таблица 5.12.** Характеристика годового теплового стока р. Северная Двина, его внутригодового распределения и многолетней изменчивости

ТЕПЛОВОЙ СТОК ЗА 1981-2018 ГГ. Эдж/год, Эдж/мес								
Wt, Эдж/год	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
2,7	0,01	0,7	0,9	0,5	0,3	0,2	0,1	0,0
Изменения теплового стока за период 1991-2018 гг. по сравнению с 1961-1990 гг.								
0,5	0,00	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

*Изменения ледотермического режима устьевой области и бассейна р. Онега под влиянием климатических изменений.*

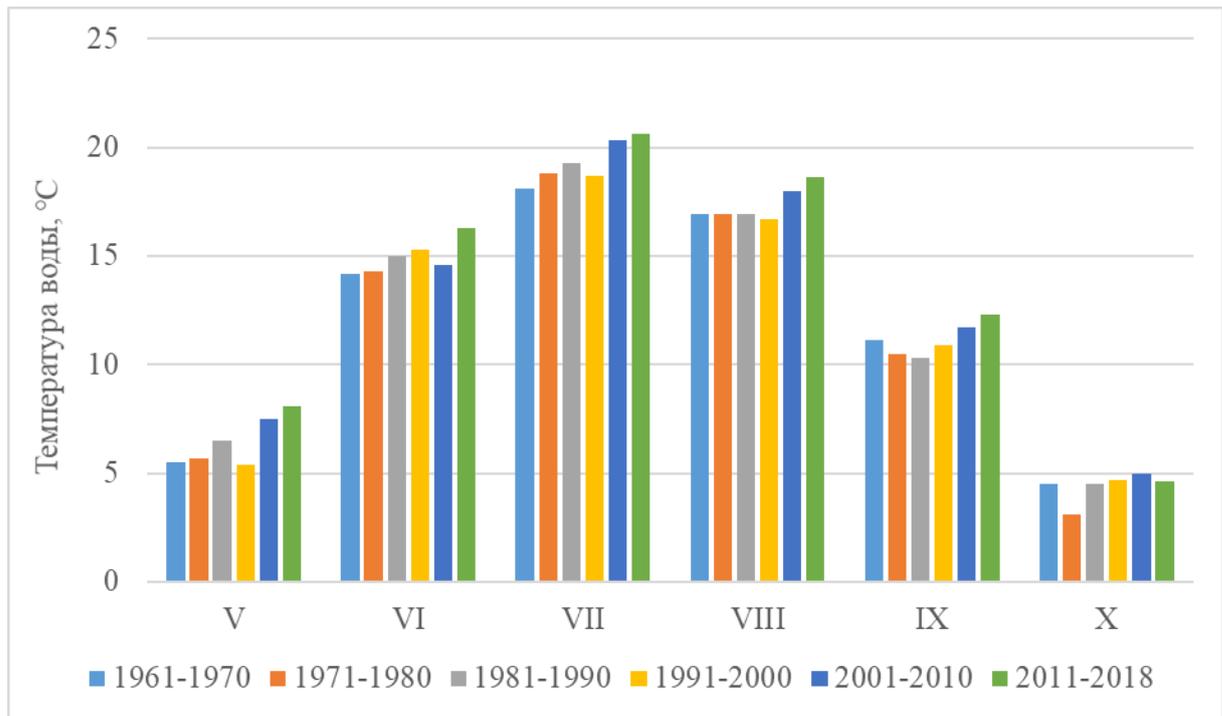
Данные о температурах воды ГМС Онега показывают наличие статистически значимого тренда (по Спирмену с уровнем значимости  $\alpha=0,05$ ) во все месяцы кроме апреля и декабря (1945-2021 г.). При этом, в феврале и марте тренд отрицательный. Положительных среднемесячных температур в эти месяцы не наблюдалось с 1977 г., хотя до этого среднемесячные температуры воды составляли  $0,01^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, не смотря на статистическую значимость тренда данные изменения можно считать находящимися в пределах погрешности измерений.

Данные о среднемесячных температурах воды на гидрологическом посту р. Онега – д. Порог показывают наличие статистически значимого тренда (по Спирмену с уровнем значимости  $\alpha=0,05$ ) в мае, июне и сентябре.

В таблице 5.13 представлены средние температуры воды на гидрологическом посту Порог за отдельные десятилетия XX и XXI вв., на рисунке 5.7 приведена их визуализация.

**Таблица 5.13.** Средние температуры воды за декады XX и XXI вв. на гидрологическом посту р. Онега – д. Порог

Декада	Средняя месячная температура воды за декаду, $^{\circ}\text{C}$					
	V	VI	VII	VIII	IX	X
1961-1970	5,5	14,2	18,1	16,9	11,1	4,5
1971-1980	5,7	14,3	18,8	16,9	10,5	3,1
1981-1990	6,5	15	19,3	16,9	10,3	4,5
1991-2000	5,4	15,3	18,7	16,7	10,9	4,7
2001-2010	7,5	14,6	20,3	18	11,7	5
2011-2018	8,1	16,3	20,6	18,6	12,3	4,6



**Рисунок 5.7.** Средние температуры воды за декады XX и XXI вв. на гидрологическом посту р. Онега – д. Порог

Как и для бассейна р. Северная Двина для р. Онега характерно увеличение температур воды во все теплые месяца на протяжении 2-й половины XX в. и начала XXI в. Особенно сильное повышение температур воды характерно для 2-х последних десятилетий.

Тепловой сток р. Онеги, при этом, практически не изменился. Характеристики внутригодового распределения теплового стока р. Онеги и его изменчивости приведены в таблице 5.14.

**Таблица 5.14.** Характеристика годового теплового стока р. Онега, его внутригодового распределения и многолетней изменчивости

ТЕПЛОВОЙ СТОК ЗА 1981-2018 ГГ. Эдж/год, Эдж/мес								
Wt, Эдж/год	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
0,5	0,00	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
Изменения теплового стока за период 1991-2018 гг. по сравнению с 1961-1990 гг.								
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0

Ряд наблюдений за датой появления льда на гидрологическом посту р. Онега - д. Порог неоднороден за период 1951-2014 гг. согласно непараметрическому критерию Манна-Уитни. За период 1951-2014 гг. выявлен значимый тренд согласно критерию ранговой корреляции Спирмена. Уровни значимости в обоих анализах  $\alpha=0,05$ .

Изменение даты появления льда за период 1981-2014 гг. (период современных климатических условий) по сравнению с 1951-1980 гг. (базовый климатический период)

составило 8 суток в сторону более поздних дат. Величина среднего квадратического отклонения сроков появления льда за 1951-2014 гг. составила 13 суток, за период климатических изменений она увеличилась на 2 суток.

Ряд наблюдений за датой замерзания на гидрологическом посту р. Онега - д. Порог однороден за период 1951-2014 гг. согласно непараметрическому критерию Манна-Уитни. Значимого тренда за тот же период не выявлено согласно критерию ранговой корреляции Спирмена. Уровни значимости в обоих анализах  $\alpha=0,05$ .

Изменение даты замерзания за период 1981-2014 гг. по сравнению с 1951-1980 гг. составило 9 суток в сторону более поздних дат. Величина среднего квадратического отклонения сроков появления льда за 1951-2014 гг. составила 18 суток, за период климатических изменений она увеличилась на 7 суток.

Ряд наблюдений за датой начала ледохода на гидрологическом посту р. Онега - д. Порог неоднороден за периоды 1951-1980 гг. и 1981-2014 гг. согласно непараметрическому критерию Манна-Уитни. За период 1951-2014 гг. выявлен значимый тренд согласно критерию ранговой корреляции Спирмена. Уровни значимости в обоих анализах  $\alpha=0,05$ .

Изменение даты начала ледохода за период 1981-2014 гг. по сравнению с 1951-1980 гг. составило 4 суток в сторону более ранних дат. Данное изменение статистически значимо. Величина среднего квадратического отклонения сроков появления льда за 1951-2014 гг. составила 6 суток, за период климатических изменений она уменьшилась на 1 сутки.

Ряд наблюдений за датой очищения ото льда на гидрологическом посту р. Онега - д. Порог неоднороден за период 1951-2014 гг. согласно непараметрическому критерию Манна-Уитни. Значимого тренда за тот же период не выявлено согласно критерию ранговой корреляции Спирмена. Уровни значимости в обоих анализах  $\alpha=0,05$ .

Изменение даты очищения ото льда за период 1981-2014 гг. по сравнению с 1951-1980 гг. составило 3 суток в сторону более ранних дат. Величина среднего квадратического отклонения сроков появления льда за 1951-2014 гг. составила 9 суток, за период климатических изменений она уменьшилась на 1 сутки.

Сходные закономерности выявлены на гидрологическом посту р. Онега – д. Турчасово. В отличие от бассейна р. Северная Двина на р. Онега значимо изменились сроки появления льда и сроки начала весеннего ледохода, при статистически незначимо изменившихся датах замерзания и очищения ото льда. Тем не менее, период ледостава сократился в среднем на 2 недели.

## Глава 6. Оценки будущих характеристик стока рр. Онега и Северная Двина

В целом на Северных реках отмечается увеличение годового стока. Интересно, что на реке Северная Двина до середины 70-х годов наблюдалась тенденция к уменьшению среднегодовых расходов воды, однако впоследствии также наметилась тенденция к увеличению.

В работе исследовательской группы из Гидрометцентра России [Бельчиков и др., 2013] представлены оценки возможных климатических изменений для бассейна реки Северная Двина на конец XXI века.

В данной работе были использованы 7 моделей общей циркуляции атмосферы, описание которых представлены в таблице 6.1.

**Таблица 6.1.** Модели общей циркуляции атмосферы, использованные для получения прогнозных гидрологических характеристик на конец XXI века [Бельчиков и др, 2013]

Модель	Производитель	Краткая информация
CCMA	Канадский центр моделирования и анализа климата, Канада	Запущена в 2005 г.; третье поколение МОЦА; атмосферный блок обновлен
GFDL <sub>1</sub>	Геофизическая лаборатория динамики сред, США	Запущена в 2004 г.; относится к первому семейству моделей "cm2.x"; включает блоки: атмосфера, океан, морские льды и поверхность суши
GFDL <sub>2</sub>	То же	То же семейство моделей; атмосферный блок имеет другое динамическое ядро; другая схема временной сетки
INM	Институт вычислительной математики РАН, Россия	Запущена в 2004 г.; включает блоки: атмосфера, океан, морские льды, вегетация, континентальный лед
MRI	НАСА, США	Запущена в 2004 г.; включает блоки: атмосфера, океан, морские льды, вегетация, континентальный лед
NCAR1	Национальный центр по атмосферным исследованиям, США	Запущена в 2004 г.; компоненты: атмосфера, океан, морские льды, поверхность суши
NCAR2	То же	Похожие характеристики

Прогноз изменения характеристик стока осуществлялся в соответствии с сценарием изменения климата А2. Согласно оценкам МГЭИК при сценарии А2 изменение температуры воздуха на конец XXI века (за 2090-2099 гг. по сравнению с 1980-1999 гг.) составит от 2 до 5,4 °С. Всего в работе было выделено два периода: середина XXI века

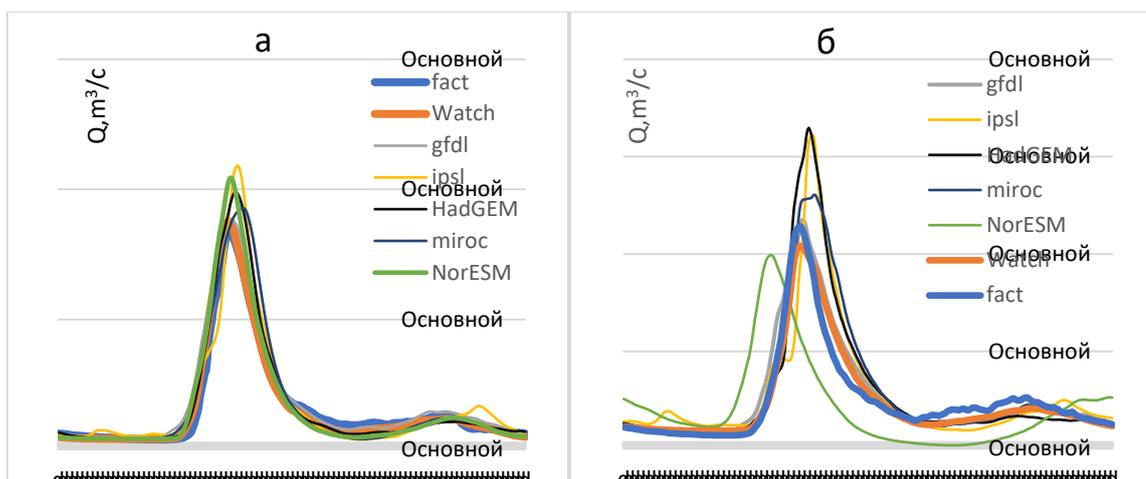
(2046—2065 гг.) и конец XXI века (2081—2100 гг.). По итогам использования перечисленных моделей авторами было получено, что к концу XXI в. в результате увеличения количества осадков годовой сток может увеличиться на 20—60% и даже больше. Из-за потепления планируется уменьшение снеготалола к моменту начала половодья и увеличение количества осадков весной, с апреля по июнь. При этом согласно проведенным расчетам возможно увеличение стока в период половодья, однако, несмотря на увеличение объема стока максимальные расходы воды будут меньше.

Вследствие увеличения осадков и существенного повышения температуры зимой ожидается значительное увеличение зимнего стока (пять моделей из семи прогнозируют его увеличение в 1,7—2,4 раза). Из-за вызванного потеплением увеличения испарения увеличение летне-осеннего стока предполагается незначительным.

Еще одна работа по прогнозу характеристик стока была выполнена на кафедре гидрологии суши МГУ имени М.В. Ломоносова [Крыленко и др., 2019]. В ее основе лежало использование модели формирования стока ECOMAG, данных реанализа WATCH (WATer and global CHange), данные которой были доступны за период с 1971 по 2001 г. и пять климатических моделей (GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM и NorESM1-M) проекта CMIP5, предоставленных Потсдамским Институтом исследований климата в рамках проекта ISI-MIP2a.

Моделирование гидрографов стока на период климатического прогноза до конца 21 в. было проведено для двух климатических сценариев - сценария наименьшего воздействия rcp2.6, который подразумевает, что пик выбросов парниковых газов приходится на 2010 – 2020 годы, после чего произойдет спад, и наиболее экстремального сценария rcp8.5, предполагающего, что выбросы продолжают расти в течение столетия.

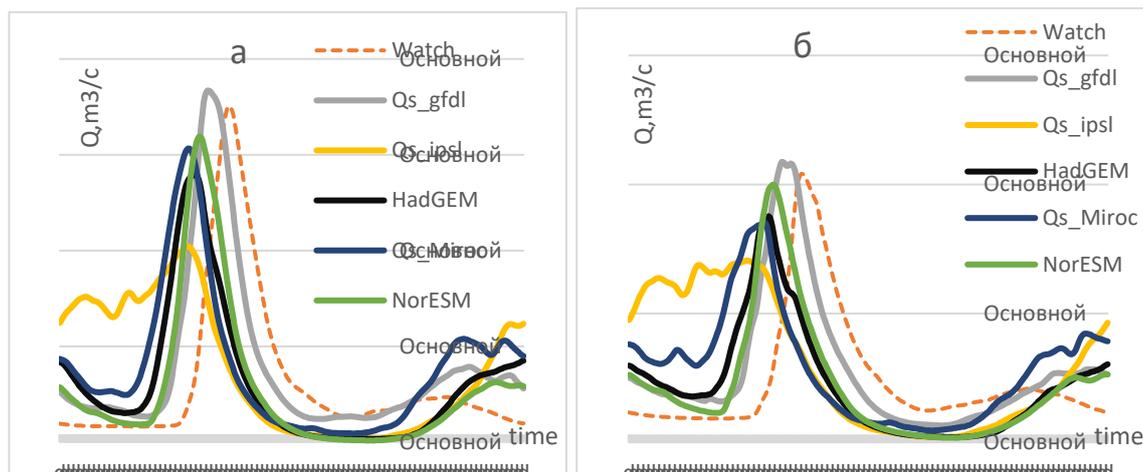
Для обеих рек получено хорошее соответствие смоделированных и фактических гидрографов при расчетах по данным реанализа WATCH в замыкающих створах (рисунок 6.1). Среднее значение критерия Нэша-Сатклифа (NSE) и отклонение объемов стока, рассчитанных с использованием базы данных WATCH от фактических (BIAS) для реки Онеги составило 0.81 и 2%, для реки Северной Двины – 0.89 и 0.2%.



**Рисунок 6.1.** Среднегодовые гидрографы, полученные на основе модели ECOMAG по данным климатических моделей и реанализа WATCH за период с 1971 по 2001 год: а) Северная Двина (пост Усть-Пинега), б) Онега (пост Порог).

По результатам моделирования, при использовании моделей GFDL-ESM2M, IPSL-CM5A-LR и NorESM1-M при сценарии rcp2.6 для реки Онеги в конце века наблюдается увеличение среднегодового объёма стока на 8 - 11%. Для моделей HadGEM2-ES и MIROC-ESM-CHEM наоборот наблюдается уменьшение объёмов стока на 4 - 5%. В среднем по ансамблю годовой объём стока увеличивается на 3.3%. Для сценария rcp8.5 наблюдается другая ситуация. При использовании модели HadGEM2-ES среднегодовой объём стока в конце века уменьшается на 21%, а для модели IPSL-CM5A-LR увеличивается на 6%. В остальных случаях изменения не превышают 1.5%. В среднем объём годового стока уменьшается на 2.7%. Похожие результаты получаются и для бассейна р. Северной Двины. Для первого сценария только в случае использования модели NorESM1-M наблюдается уменьшение объёмов стока на 4%. В остальных случаях наблюдается увеличение от 1 до 14%. В среднем годовой объём стока к концу века увеличивается на 5.4%. При сценарии rcp8.5 в среднем объём стока в среднем уменьшается на 0.5%. Получаемые при моделировании изменения стока обусловлены изменениями средних значений температуры и количества осадков. Для обоих бассейнов в случае сценария rcp2.6 температура, и осадки растут до середины прогнозного периода (на величину до 2.7 °C и 7-10% соответственно), и после рост прекращается. При реализации сценария rcp8.5 рост температуры и осадков наблюдается на протяжении всего периода и к концу XXI в. составляет 6-7°C и 20% для осадков. Так как температура в этом сценарии относительно осадков увеличивается существенно, то рост испарения превышает рост осадков, и наблюдается уменьшение среднегодового объёма стока обеих рек.

Если рассматривать возможные изменения внутригодового распределения стока к концу XXI в. (рисунок 6.2), то и для бассейна Северной Двины, и для бассейна Онеги период половодья начинается раньше на 15-35 дней для разных климатических моделей по сравнению с современным периодом, наблюдается увеличение меженных расходов. Сильно отличаются результаты, основанные на данных модели IPSL-CM5A-LR: для обоих бассейнов, наблюдается продолжительный зимний паводочный период. Максимальные расходы в половодье увеличились относительно исторического периода только при расчетах по данным модели GFDL, во всех остальных случаях они стали меньше.



**Рисунок 6.2.** Среднеголетние гидрографы, полученные при моделировании на основе модели ECOMAG по данным климатических моделей за период с 2070 по 2099 год и среднеголетний гидрограф по данным WATCH за 1971- 2001: а) Северная Двина, б) Онега

## **Глава 7. Оценки будущих характеристик ледотермического режима рр. Онега и Северная Двина**

Оценки будущего ледового режима рек как в России, так и за рубежом проводятся преимущественно статистическими методами [Prowse et al, 2012a,2012b], хотя известны разработки отдельных физико-математических моделей для рек Канады.

Основными предикторами в статистическом оценивании выступают характеристики термического режима атмосферы: среднемесячные температуры воздуха, сроки переходов температур воздуха через  $0^{\circ}\text{C}$  весной и осенью, суммы положительных и отрицательных температур воздуха зимнего периода. При построении многомерных регрессионных зависимостей вводится также предиктор стока.

В данной работе в качестве предикторов будущего ледового режима выступали сроки различных фаз ледового режима рек: даты появления льда, даты замерзания (установления ледостава), даты начала ледохода и даты очищения ото льда. Предикторами выступали даты устойчивого перехода температур воздуха через  $0^{\circ}\text{C}$ , а также величины месячного стока рек, при возможности. Зависимости между этими величинами устанавливались с помощью уравнений регрессии и множественной регрессии.

Для построения регрессионных моделей ряды предикторов и предиктантов осреднялись скользящим средним по 20 лет. При этом, если коэффициент аппроксимации между полученными рядами сроков ледовых явлений и сроков перехода температур оставались менее 0,7, из исходных рядов удалялись отскакивающие или экстремальные значения дат перехода. Удаление экстремальных значений является обоснованным, так как максимальные величины природных явлений обычно имеют более специфический генезис по сравнению с ординарными условиями. Отскакивающие точки связаны либо с очень коротким, либо очень длинным промежутком времени между датой перехода температуры через  $0^{\circ}\text{C}$  и датой фазы ледового режима. Осреднение скользящим средним позволяет сгладить межгодовые вариации рассматриваемых характеристик и повысить, таким образом, качество регрессионных моделей. Сроки перехода температур воздуха через  $0^{\circ}\text{C}$  определялись методом Д.А. Педя [Педь, 1951].

Величина среднемесячного стока месяца современного наступления той или иной фазы ледового режима увеличивалась соответственно на 10, 20, 30, 40 и 50%.

Оценки вырабатывались на середину XXI в. в связи с ограничениями регрессионных моделей требующих наличия точек для аппроксимации, по возможности, по всей длине графика зависимости.

Данные о будущих температурах воздуха были получены из климатической модели Института вычислительной математики РАН.

Результаты оценок для замыкающих створов представлены в таблице 7.1.

**Таблица 7.1.** Результаты оценивания будущих характеристик ледового режима рр. Онега и Северная Двина

Река-пост	Характеристика	Современная дата	Без увеличения стока	Увеличение стока на				
			2041-2060	10%	20%	30%	40%	50%
р. Северная Двина - д.Усть-Пинега	Дата появления льда	28.окт	11 ноя	11 ноя	11 ноя	10 ноя	10 ноя	10 ноя
р. Онега - д. Порог		09.ноя	21 ноя	23 ноя	24 ноя	26 ноя	28 ноя	29 ноя
р. Северная Двина - д.Усть-Пинега	Дата установления ледостава	15.ноя	20 дек	20 дек	20 дек	20 дек	20 дек	20 дек
р. Онега - д. Порог		19.ноя	23 ноя	23 ноя	24 ноя	24 ноя	25 ноя	25 ноя
р. Северная Двина - д.Усть-Пинега	Дата начала ледохода	28.апр	30 апр	29 апр	28 апр	27 апр	26 апр	25 апр
р. Северная Двина - д.Усть-Пинега	Дата очищения ото льда	8 мая	8 май	7 май	6 май	5 май	5 май	4 май

Оценки показывают, что в замыкающих створах рек Онега и Северная Двина наибольшим изменениям может подвергнуться период замерзания, со смещением сроков наступления фаз ледового режима на 2-3 недели. Изменения стока мало влияют на результаты оценивания.

Так как оценивание будущего ледового режима показывает, что может появиться больше месяцев с положительными температурами воды, оценки термического режима целесообразно проводить исключительно для июля, как месяца температуры воды в котором наиболее обусловлены астрономическими условиями, не подверженным климатическим воздействиям.

Оценки выполнялись по разработанным зависимостям температур воды от температур воздуха. Использовалось предположение о повышении температур воздуха на +1, +5 и +10°C. Использовалось превышение над максимально наблюдаемой температурой воздуха за период наблюдений. Оценочные величины температур воды для д. Усть-Пинега оказались в итоге выше температур воздуха-предикторов на 0,3-1°C. Таким образом, июльские температуры воды предположительно продолжат следовать за температурами воздуха с небольшими превышениями вследствие высокой теплоемкости водных масс.

## Выводы

В рамках настоящего исследования был проведен статистический анализ имеющихся рядов наблюдений среднегодовых расходов воды, максимальных срочных расходов за период половодья, средние расходы воды за каждую фазу водного режима. Для выявления тренда, то есть изменения рассматриваемой величины со временем, была проведена предварительная проверка на нормальное распределение и на однородность. Соответствующие статистические тесты дали положительные результаты при уровне значимости 5%. Для реки Северная Двина не было выявлено статистически значимых изменений ни в среднегодовых расходах воды, ни в средние значения за отдельные фазы водного режима (зимняя межень, весенний сток, летне-осенняя межень), ни в максимальных срочных расходах воды. Для реки Онега был обнаружен положительный тренд в среднегодовых расходах и в максимальных срочных расходах воды.

Также для рассматриваемых величин были построены разностно-интегральные кривые. В настоящее время рассматриваемые реки во все сезоны года находятся в периоде повышенной водности.

Достаточно значительные изменения произошли в ледотермическом режиме рассматриваемых рек. Происходит уменьшение периода с ледовыми явлениями.

В низовьях р. Северная Двина наиболее значимые изменения наблюдаются в дате начала весеннего ледохода. Продолжительность ледостава за последние 30 лет сократилась суммарно на 10 суток и в среднем составляет 161 сутки на г/п Усть-Пинега (162 суток в г. Архангельске).

В отличие от бассейна р. Северная Двина на р. Онега значимо изменились сроки появления льда и сроки начала весеннего ледохода, при статистически незначимо изменившихся датах замерзания и очищения ото льда. Тем не менее, период ледостава сократился в среднем на 2 недели.

В низовьях р. Северная Двина обращает на себя внимание рост температур воды в последние десятилетия XX в. и, в большинстве случаев, в первые десятилетия XXI в. Особенно заметен рост температур воды в последние декады в мае, июне, августе и сентябре – то есть в переходные сезоны. Разница температур воды с предыдущими декадами может достигать 1-2°C. Обращает на себя внимание также некоторая цикличность, в особенности – в ноябре и июне.

Как и для бассейна р. Северная Двина для р. Онега характерно увеличение температур воды во все теплые месяца на протяжении 2-й половины XX в. и начала XXI в. Особенно сильное повышение температур воды характерно для 2-х последних десятилетий.

### Список использованной литературы

1. Брызгало В.А., Никаноров А.М., Косменко Л.С., Решетняк О.С. Устьевые экосистемы крупных рек России: антропогенная нагрузка и экологическое состояние. – Ростов-на-Дону, 2015.
2. Бельчиков В. А., Полунин А. Я., Симонов Ю. А., Христофоров А. В./ Оценка возможных климатических изменений стока рек бассейна Северной Двины в XXI в / В. А. Бельчиков, А. Я. Полунин, Ю. А. Симонов, А. В. Христофоров // Метеорология и гидрология. — 2013. — № 2. — С. 84–92. Василенко А. Н., Магрицкий Д. В., Фролова Н. Л. Закономерности изменений среднегодовой температуры воды рек Арктической зоны России в связи с изменениями климата // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. — 2020. — № 2. — С. 8–22.
3. Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования. /Под ред. Н. И. Алексеевского. — М., ГЕОС, 2007, 584 с.
4. Гидрология устьевой области Северной Двины. М.: Гидрометеоиздат, 1965. 376 с.
5. Грищенко, И. В. Характеристика ледовых процессов в устье Р. Северной Двины и тенденции их развития в условиях изменения климата / И. В. Грищенко // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Естественные науки. – 2016. – № 1. – С. 5-11. – DOI 10.17238/issn2227-6572.2016.1.5.
6. Завадский А.С., Иванов В.В., Рулёва С.Н., Чалов Р.С., Чалов С.Р. Русловые процессы, ледовые явления и регулирование русла в Холмогорском разветвлении на реке Северной Двине // Эрозия почв и русловые процессы. Т. 17. М.: Географ. ф-т МГУ, 2010. С. 194–213.
7. Кислов А. В. Климат в прошлом, настоящем и будущем. — М., МАИК “Наука/Интерпериодика”, 2001, 351 с
8. Колий В. М., Агафонова С. А. Ледовый режим устьевых участков рр. Онега, Мезень и Кулой по данным космических снимков // Четвертые виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению. Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербург, 2020. — С. 1086–1091.
9. Крыленко И. Н., Голосной Д. А., Жук В. А. Оценка притока воды в Белое море с территории бассейнов рек Онеги и Северной Двины на основе модели формирования стока // Труды VII Международной научно-практической конференции “Морские исследования и образование (MARESEDU-2018)” Том I (IV): [сборник]. — Т. 1 из Труды

VII Международной научно-практической конференции “Морские исследования и образование (MARESEDU-2018)”. — ООО ПолиПРЕСС Тверь, 2019. — С. 161–171.

10. Лебедева С.В. Динамика потока в приливном многорукавном устье крупной реки: на примере р. Северная Двина : автореферат диссертации на соискание степени кандидата географических наук : 25.00.27 / Лебедева Серафима Витальевна; [Место защиты: МГУ имени М.В. Ломоносова]. - Москва, 2016. - 26 с.

11. Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т.34. №5. С.735-747

12. Лупачев Ю.В. Особенности гидрологического режима устьевой области Онеги // Труды ГОИН.-1982.-Вып.161.- С.92-96.

13. Магрицкий Д.В. Тепловой сток рек в моря российской Арктики и его изменения // Вестник Московского университета. 2009. Сер. 5. География. № 5.С. 69–77.

14. Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.

15. Мухин В. М. О влиянии изменений климата на возникновение катастрофических ситуаций на горных реках. — Метеорология и гидрология, 1994, № 5, с. 106 — 111.

16. Педь Д.А. 1951. Об определении дат устойчивого перехода температуры воздуха через определенные значения. - Метеорология и гидрология, № 10, с. 38–39.

17. Полонский В.Ф., Лупачев Ю.В., Скриптунов Н.А. Гидролого-морфологические процессы в устьях рек и методы их расчета (прогноза). СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 383 с.

18. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 3. Северный край. / Под ред. Жила И.М. и Алюшинской Н.М. – Л.: Гидрометиздат, 1972. 662 с.

19. Самойлов И.В. Устья рек. М.: Государственное изд-во географической литературы, 1952. 526 с.

20. Современное гидрологическое состояние устья р.Колымы по материалам летней экспедиции в 2019 г / Д. В. Магрицкий, Н. Л. Фролова, С. А. Агафонова и др. // Труды IV Всероссийской конференции Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития имени Л.Н. Карлина. — Санкт-Петербург, 2020. — С. 243–247

21. Соколова Е.М. Термический режим рек СССР // Труды ГГИ. 1951. Вып. 30(84). С. 1–112.

22. Сумачев, А. Э. Изменение климата и его влияния на гидрологический режим Северной Двины / А. Э. Сумачев // Естественные и технические науки. – 2018. – № 9(123). – С. 57-63.

23. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Онега. Книга 1. Утверждена приказом ДПБВУ №147 п/д от 19.12.2014.
24. Толстиков, А. В. Изменчивость температуры поверхностного слоя Белого моря / А. В. Толстиков. – Москва: Издательство ГЕОС, 2016. – 219 с. – ISBN 9785891187108.
25. Шикломанов И. А., Шикломанов А. И. Изменение климата и динамика притока речных вод в Северный Ледовитый океан. — Водные ресурсы, 2003, т. 30, № 6, с. 645—654.
26. Agafonova S. A., Vasilenko A. N. Hazardous ice phenomena in rivers of the russian arctic zone under current climate conditions and the safety of water use // GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY. — 2020. — Vol. 13, no. 2. — P. 43–51.
27. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. /S. Solomon et al. (eds.). — Cambridge, United Kingdom and New York, NY, U SA, Cambridge University Press, 2007, 996 p.
28. Lammers R.B., Pundsack J.W., Shiklomanov A.I. Variability in river temperature, discharge, and energy flux from the Russian pan-Arctic landmass. J. Geophys. 2007. Res. 112. G04S59 <http://dx.doi.org/10.1029/2006JG000370>.
29. Lilliefors, H. On the Kolmogorov–Smirnov test for normality with mean and variance unknown. Journal of the American Statistical Association, Vol. 62, No. 318. Jun., 1967., pp. 399-402.
30. Magritsky D. V., Frolova N. L., Pakhomova O. M. Potential hydrological restrictions on water use in the basins of rivers flowing into russian arctic seas // GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY. — 2020. — Vol. 13, no. 2. — P. 25–34.
31. Terry Prowse, Knut Alfredsen, Spyros Beltaos, Barrie Bonsal, Claude Duguay, Atte Korhola, Jim McNamara, Reinhard Pienitz, Warwick F. Vincent, Valery Vuglinsky, Gesa A. Weyhenmeyer. 2012a. Past and Future Changes in Arctic Lake and River Ice. *Royal Swedish Academy of Sciences: 53-62*. DOI 10.1007/s13280-011-0216-7
32. Terry Prowse, Knut Alfredsen, Spyros Beltaos, Barrie R. Bonsal, William B. Bowden, Claude R. Duguay, Atte Korhola, Jim McNamara, Warwick F. Vincent, Valery Vuglinsky, Katey M. Walter Anthony, Gesa A. Weyhenmeyer., 2012b. Effects of Changes in Arctic Lake and River Ice. *Royal Swedish Academy of Sciences: 63-74*. DOI 10.1007/s13280-011-0217-6
33. Shapiro S.S., Francia R.S. An appriximate analysis of variance test fo normality // J. Amer. Statist. Assoc., 337, 1972. – P.215-216.

34. Shapiro S.S., Wilk M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples) // *Biometrika*, 52, 1965. – P.591-611.

35. Student. The probable error of a mean. // *Biometrika*. 1908. № 6 (1). P. 1-25

36. Единая система информации о Мировом Океане - <http://portal.esimo.ru/portal>  
(дата обращения: 07.08.2021)