



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра инженерной гидрологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему **Прогнозирование ледовых явлений
на Онежском озере**

Исполнитель

Степанов Петр Михайлович

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель

К.Т.Н., доцент

(ученая степень, ученое звание)

Гайдукова Екатерина Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой


(подпись)

К.Т.Н., доцент

(ученая степень, ученое звание)

Гайдукова Е.В.

(фамилия, имя, отчество)

«16» мая 2025г.

Санкт-Петербург
2025

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	4
1 Физико-географическая характеристика бассейна Онежского озера и его гидрография	
1.1 Географическое описание	6
1.2 Рельеф и геологическое строение	7
1.3 Почвы	11
1.4 Гидрохимия	12
2 Гидрографическая сеть бассейна Онежского озера	
2.1 Речная Сеть	14
2.2 Озерность	15
2.3 Гидрологическая изученность	16
3 Климат Онежского озера	
3.1 Температурный режим	17
3.2 Осадки	18
3.3 Ветер	19
4 Термический режим Онежского озера	
4.1 Основные сведения	20
4.2 Исследование термического режима Онежского озера	22
5 Ледовый режим	25
6 Разработка методики прогнозирования ледовых явлений на Онежском озере	
6.1 Введение в прогнозирование ледовой обстановки	30
6.2 Основные принципы прогнозирования ледовых явлений	31
6.3 Математические модели прогнозирования ледовых явлений	31
6.3.1 Эмпирические модели	31
6.3.2 Физико-математические модели	32

7	Спутниковые данные и модели	
7.1	Отбор данных для обработки	34
7.2	Методика обработки космических файлов	37
7.2.1	Создание алгоритма обработки	37
7.3	Исследование наземных данных толщины льда и температуры воздуха	41
7.4	Сопоставление наземных данных и данных с искусственных спутников	56
7.5	Апробация методики прогноза	63
	Заключение	67
	Список использованных источников	68
	Приложение А – Показатель площади льда после дешифровки	71
	Приложение Б – Показатель площади льда после дешифровки на дополнительных снимках	73
	Приложение В – Космический снимок от 06.02.1991	74
	Приложение Г – Космический снимок от 09.02.1992	75
	Приложение Д – Космический снимок от 27.02.1987	76
	Приложение Е – Космический снимок от 06.04.1995	77
	Приложение Ж – Космический снимок от 05.02.1985	78
	Приложение З – Космический снимок от 01.04.1985	79
	Приложение И – Космический снимок от 24.04.1990	80
	Приложение К – Космический снимок от 14.04.1998	81
	Приложение Л – Космический снимок от 30.04.1998	82
	Приложение М – Космический снимок от 15.03.1987	83
	Приложение Н – Космический снимок от 17.03.2020	84
	Приложение О – Космический снимок от 23.08.2020 г.	85

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность данной работы связана с потребностью прогнозирования ледовых явлений и их сроков для судовой навигации Онежского озера в условиях изменения климата. Основанием исследований в данной работе является статистическая информация, например данные о температуре воды, толщине льда и площади покрытия водного зеркала льдом.

В данной работе рассматривается изменение температурного и ледового режима озера в современных климатических условиях через возможности дистанционного спутникового мониторинга.

Цель данной работы – дополнение прогнозных модели путем введения в их расчет данных спутникового зондирования.

Для достижения цели были выполнены следующие задачи:

- А) Изучить возможности спутникового мониторинга в пределах Онежского озера.
- Б) Импортировать спутниковые снимки.
- В) Изучить и применить алгоритмы дешифрирования спутниковых снимков на класс “Вода-Лёд”.
- Г) Связать полученные данные с ретроспективными наземными данными (температура, толщина льда).
- Д) Апробировать результаты.

Магистерская диссертация имеет научную новизну так как рассматривает исследование ледового режима Онежского озера через спутниковый мониторинг и применение его в прогнозировании ледовой обстановки. Диссертация включает также увязку данных полученных с космических снимков и наземных архивных данных с озерных постов. Данная работа может иметь большое практическое применение по причине того что озера являются большими площадными объектами, и прогнозирование и моделирование явлений крайне затруднительно.

Озерные посты не могут охватить большую площадь озера и характеризуют лишь малую прибрежную часть. Магистерская работа предполагает решение данного вопроса с помощью применения спутниковых данных и закономерности наземных данных.

Исследования по данному теме рассматривались в следующих статьях:

1) Исследование многолетнего ледово-термического режима онежского озера. Степанов П.М. В сборнике: Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии. Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции. Иркутск, 2024. С. 222-225.

2) Исследование многолетнего ледово-термического режима Онежского озера. Степанов П.М., Головань Е.В. Гидрология и океанология – 2023. Казань, 2023. 136–140 с.

Магистерская диссертация предполагает дальнейшее исследование использования спутниковых технологий в построении прогнозных моделей. Дальнейшие разработки могут быть направлены на изучение моделирования формирования толщи льда на поверхности Онежского озера.

1 ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БАССЕЙНА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА И ЕГО ГИДРОГРАФИЯ

1.1 Географическое описание

Онежское озеро, называвшееся в старину Анизким (от финского Aaniēn järvi – голосистое) и входящее в бассейн Ладожского озера значительно менее исследовано чем последнее. Основным фактором изучения Онежского озера послужило стремление установить путь через озеро в Белое море.

Географические описания озера до XIX в. были малочисленными. Одним из таких описания является записки акад. Н. Озеровецкого.

Бассейн Онежского озера расположен в пределах 60,25–63,34 с.ш. и 31,37–37,59 в.д. имеет довольно вытянутую по долготе форму, с довольно сильным расширением на север и сужением на юге. Большая асимметричность бассейна имеет крайне важное значение для формирования водного режима озера, т.к. основное питание находится под воздействием гидрометеорологических условий северной части бассейна. Северная часть бассейна образует два больших выступа на северо-западе (бассейн рек Шуи и Суны) и на северо-востоке (бассейн реки Водлы). Наибольшая длина бассейна составляет около 400 км, а по параллелям 330 км. Распределение водотоков по территории озера крайне неравномерное. Река Водла впадающая в восточное побережье является самым значительным из всех бассейнов. Однако, согласно данными река не оказывает сильного воздействия на режим озера [1]. Административно принадлежит к Карелии, Ленинградской и Вологодской областям. Крупнейшими городами являются Петрозаводск, Кондопога, Медвежьегорск.

1.2 Рельеф и геологическое строение

Рельеф бассейна Онежского озера крайне неоднозначен и определяется тектоническими процессами и гляциальным влиянием. Коренные породы бассейна озера в значительной своей части занимают юго-восточную окраину Балтийского щита и только небольшая южная и юго-восточная часть бассейна выходит за его пределы. Территория залегания дочетвертичных пород приходится на большую часть озера и доминируют в северной части. Северная, особенно северо-западная части бассейна являются горными продолжениями кряжей Карелии, сложены в основном протерозойскими кристаллическими породами и характеризуются тектоническими разломами. Архейские отложения представлены сильно метаморфизованными породами и двумя группами кислых интрузивных вулканических масс (гнейсы, сланцы и амфиболиты). В восточной и западной части встречаются интрузивные породы представленные магматитами.

Четвертичные отложения сильно распространены и имеют небольшое влияние на питание и водный режим озера. Южная часть озера сложена осадочными породами, мощность которых возрастает с севера на юг и достигает максимума 140 м. Осадочные породы представлены в основном:

- Флювиогляциальными (валунные суглинки, пески и глины мощностью примерно 13м.)
- Озерно-аллювиальными отложениями (супеси, глины, алевриты, суглинки мощностью до 36м.
- Ледниково-озерными образованиями (супеси с прослоями суглинков серого и коричневатого цвета мощностью до 53 м [2].

Подробное пролегание четвертичных пород представлено на рисунке 2.

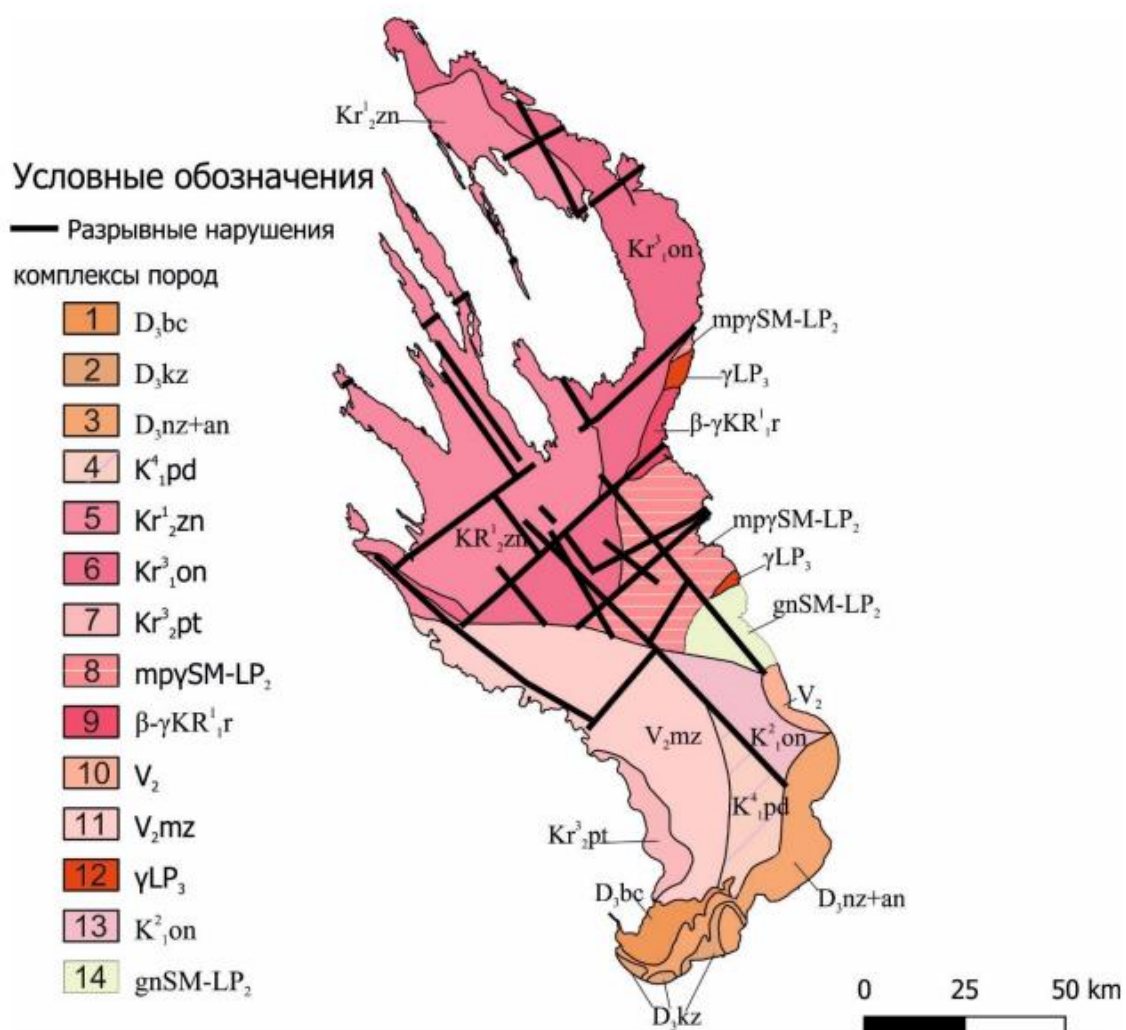
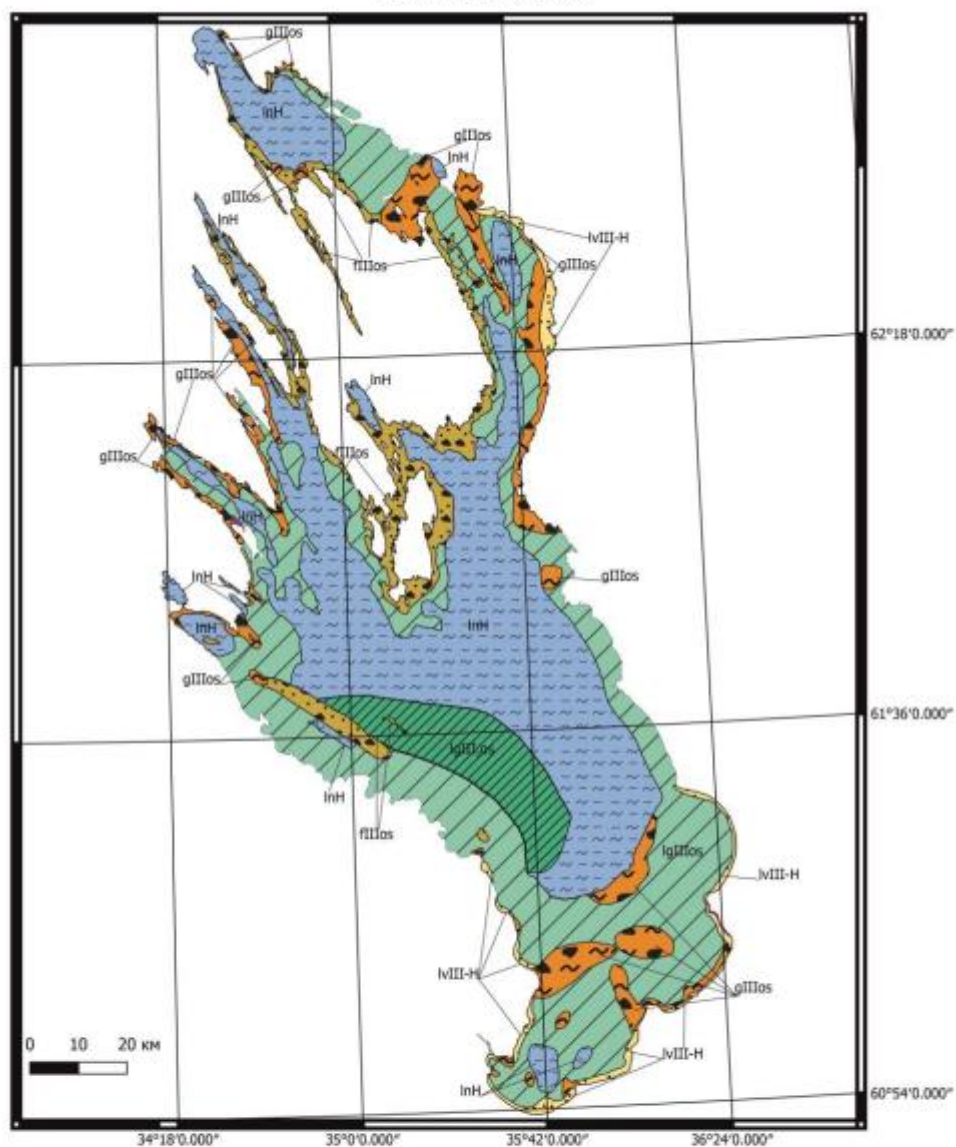


Рисунок 1 – Схема дочетвертичных образований Онежского озера.

Карта четвертичных отложений дна котловины Онежского озера
Масштаб 1:500 000



Словные обозначения

Типы отложений

- Дочетвертичные образования
- fIIos - Флювиогляциальные отложения. Песчано-галечная смесь.
- gIIos - Морены. Валунные суглинки
- IgIIos. - Лимногляциальные отложения дистальной пачки. Ленточные глины микрослоистые.
- IgII₁os - Лимногляциальные отложения проксимальной пачки. Ленточные глины слоистые.
- InH - Озёрные отложения. Гомогенизированные илы, алевропелиты.
- IvIII-H - Волновые отложения. Пески.

Рисунок 2 – Карта четвертичных отложений [2].

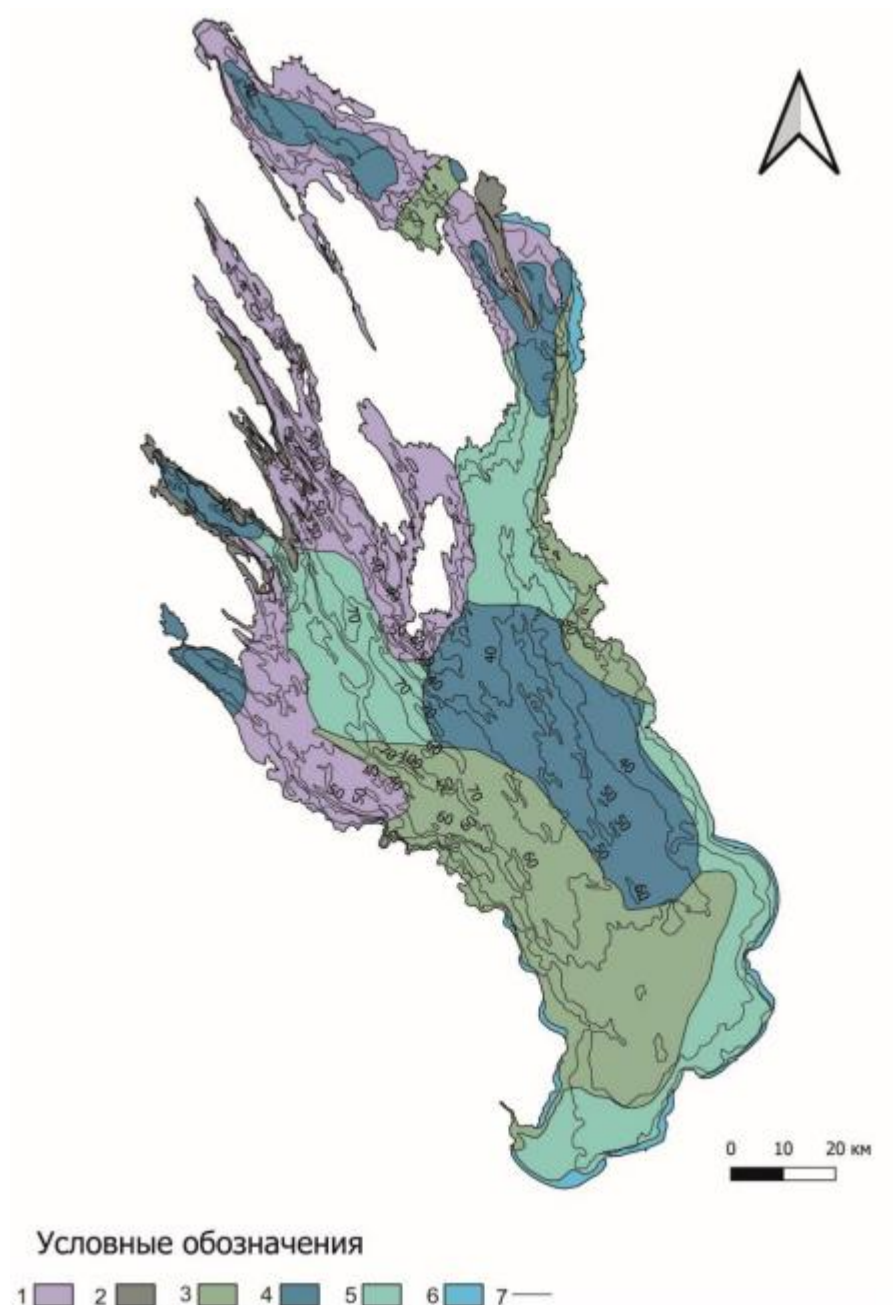


Рисунок 3 – Геоморфологическая карта Онежского озера

Ниже приведено описание обозначений. Условные обозначения: Рельеф структурно-денудационной группы: 1. Интенсивно расчлененные грядово-увалистые и фиардово-шхерные равнины на кристаллическом субстрате с проявлением современных геодинамических процессов; Рельеф аккумулятивно-денудационной группы: 2. Грядово-волнистые равнины на отпрепарированных породах кристаллического субстрата, осложнённые аккумулятивными возвышенностями ледниковой природы; 3. Холмисто-

увалистые равнины ледниковые и ледниково-озерные равнины на моренном субстрате (зоны краевых образований). Рельеф аккумулятивной группы: 4. Выровненные, местами всхолмленные, озерные нефелоидные равнины; 5. Субгоризонтальные выположенные ледниково-озерные равнины; 6. Ундалювиальные, слабо наклоненные равнины [2].

Помимо этого важным фактором формирования геологического строения а в дальнейшем рельефа является процесс эпирогенического движения или гляциоизостатическое поднятие. Считается что бассейн озера во время последнего оледенения был погружен. Однако при таянии ледника порода (Балтийский щит) начала подниматься.

1.3 Почвы

Почвы бассейна Онежского озера неоднородны в его восточной и западной частях, что является результатом различных геологических особенностей и рельефа этих районов. Преобладание аккумулятивных ледниковых форм и плаща наносов, состоящих преимущественно из грубых валунно-каменистых супесей, песков и реже – легких суглинков, способствуют развитию в бассейне, за небольшим исключением, глеевых и глееватых в различной степени подзолистых почв. Кроме того, здесь распространены также песчаные торфяно-подзолистые почвы. Остальная территория бассейна покрыта заболоченными площадями, среди которых развиты типичные верховые торфяники. Горно-Карельский район и западное побережье озера, преобладают супесчаные и песчаные валунно-каменистые, слабо оподзоленные почвы, развитые в рельефе сельг или длинных гряд, вытянутых с северо-запада на юго-восток и сложенных валунными песками, часто с ядром коренных пород, выходящих на вершинах и склонах. В северной части этого района распространены также валунные, мелко каменистые супесчаники. В понижениях между сельгами

находятся болота или более сортированные пески и супеси. Район охватывающий весь Заонежский полуостров, отличается развитием рельефа типа сельг, в связи с чем здесь преобладают также маломощные каменистые, слабо оподзоленные почвы и скелетные малоразвитые почвы на твердых породах. Местами встречаются пятнами супесчаные и песчаные подзолистые почвы, а в восточной части Заонежского полуострова распространены темноцветные, без призматической оподзоленности, почвы называемые «олонецкими черноземами». Самая северная часть его характеризуется развитием суглинистых и суглинопесчаных валунно-каменистых подзолистых почв, в комплексе с глеевой торфяно-подзолистыми. В общей характеристике, использованной для приложенной карты, были приняты три основных типа грунтов: ил, песок и камни. Илы разделяются на серо-зеленый ил и бурый; песок в подтипах – запыленный, мелкий, средний крупности и крупный с гравием; тип – камни включает в себя глыбы, валуны с галькой и отдельно большие галечные поля. Особо указаны районы, в которых под тонким слоем грунта залегает глина. Следует отметить, что эта мелкозернистая глина обнаруживается на значительно большей площади, чем в соседнем Ладожском озере. Причем выходы её находятся преимущественно в северной части озера, в большом Онего, и лишь местами обнаружены у западного и восточного берегов, в контактной зоне песчано-илистых и иловых отложений[6].

1.4 Гидрохимия

Особенности состава пород водосбора и морфометрии озерной котловины, а также неравномерное распределение антропогенной нагрузки определяют пространственную и сезонную неоднородность химических показателей в разных районах озера. Олиготрофное состояние основной водной массы озера обусловлено рядом факторов – изолированностью

загрязненных губ, огромными водными массами, дефицитом фосфора, отчего сдерживается развитие фитопланктона.

Главной составляющей приходной части баланса минеральных веществ в озере является вынос их со стоком рек, дающий 91% общего их поступления. Вода озера характеризуется низкой минерализацией (36.6 мг/л; табл. 2). Основная водная масса водоема (Большое Онего, Центральный плес, Южное Онего) характеризуется стабильностью ионного состава и минерализации (36.5 мг/л). Повенецкий залив выделяется самой высокой минерализацией (46.5 мг/л), а Петрозаводская губа – самой низкой (34 мг/л) (Онежское озеро..., 1999). Низкая минерализация воды в Онеге вызвана рядом причин и, прежде всего, положением озера в гумидной зоне (Онежское озеро..., 2010). Довольно обильные осадки при сравнительно слабом испарении способствуют просачиванию вод и хорошему промыванию почв и грунтов водосборного бассейна. Это обедняет химический состав речных вод, поступающих в Онегу. Кроме того, значительная часть бассейна Онежского озера лежит в пределах Балтийского кристаллического щита, сложенного труднорастворимыми породами [4].

Таблица 1 – Среднеголетний состав воды Онежского озера

Размерность	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	HCO_3^{-}	SO_4^{2-}	Cl^{-}	NO_3^{-}	Σ_n
Мг/л	5,2	2,3	2,2	0,7	19,0	4,5	1,8	0,9	36,6

2 ГИДРОГРАФИЧЕСКАЯ СЕТЬ БАССЕЙНА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

2.1 Речная сеть

Гидрографическая сеть Онежского озера обладает многими отличительными признаками, которые отличают его от соседних крупных бассейнов озер Ладожское и Ильмень. Характерной особенностью является наличие большого количества рек притоков с малой площадью водосбора (менее 500 – 1000 км²) и всего несколько притоков с бассейнами по площади больше 5000 км². Вторая особенность заключается в различии характера речных бассейнов в северной и южной части озера, что связано с геотектоническими процессами. Далее приведены характеристики крупнейших притоков Онежского озера.

Таблица 2 – Крупнейшие притоки Онежского озера

Название реки	Длина, км	Площадь бассейна, км ²
Шокша	24	108
Лососинка	29,5	299
Шуя	192	9 470
Суна	232	7 730
Лижма	12	1 070
Калий-ручей	21	90
Кумса	67	812
Вичка	27	160
Повенчанка	16	822
Немена	64	742
Пяльма	55	807
Туба	16	252

Название реки	Длина, км	Площадь бассейна, км ²
Водла	149	13 220
Андома	142	2 510
Вытегра	66	1 280
Мегра	77	1 380
Ошта	37	688

2.2 Озерность

В следствии ледникового генезиса расположения бассейна Онежского озера, бассейн характеризуется высокой обзорностью что в свою очередь сильно влияет на сток. Общее количество озер в бассейне порядка более 5000, а их общая площадь составляет более 3 500 км². Размер озер крайне разнообразен, однако, примерно 60 % имеют в длину до 500м и глубину 2–5м. Онежское озеро как водохранилище по морфологическим параметрам относится к долинно-котловинным.

Все озера можно подразделить на 3 типа.

1) Озера с котловинами трещино-сбросового происхождения. В основном, распространены в северной части бассейна. По форме вытянутые. Береговая линия сильно изрезана. Площадь озер варьируется в диапазоне 20–30 км³, глубина 15–30м.

2) Озера подпрудные. Характеризуются большой площадью (до 50 км²), длина до 25 км, однако небольшую глубину – до 25м.

3) Ледниковые озера. По очертанию неоднородны. Подразделяются на несколько подтипов. Характеризуется в основном небольшой площадью (0,5-1,5 км²), малой глубиной 10–20м.

4) Болотные озера. Наиболее распространены в северной и восточной части бассейна. Их распространение характеризуется водонепроницаемой породой.

2.3 Гидрологическая изученность

Онежское озеро имеет двойной статус – озеро и водохранилище (Верхнесвирское). Гидросооружение построено Ленгидропроектком в 1951 г. Таким образом, Онежское озеро является водохранилищем озерно-речного типа. Что в свою очередь может сказываться на водообмене водной массы.

Длина водохранилища составляет около 80 км, а ширина варьируется от 1 до 7 км. Средняя глубина около 10 метров, но в некоторых местах достигает до 30 метров. По данным сервиса ЕСИМО в бассейне Онежского озера функционирует порядка 120 гидрологических постов на реках.

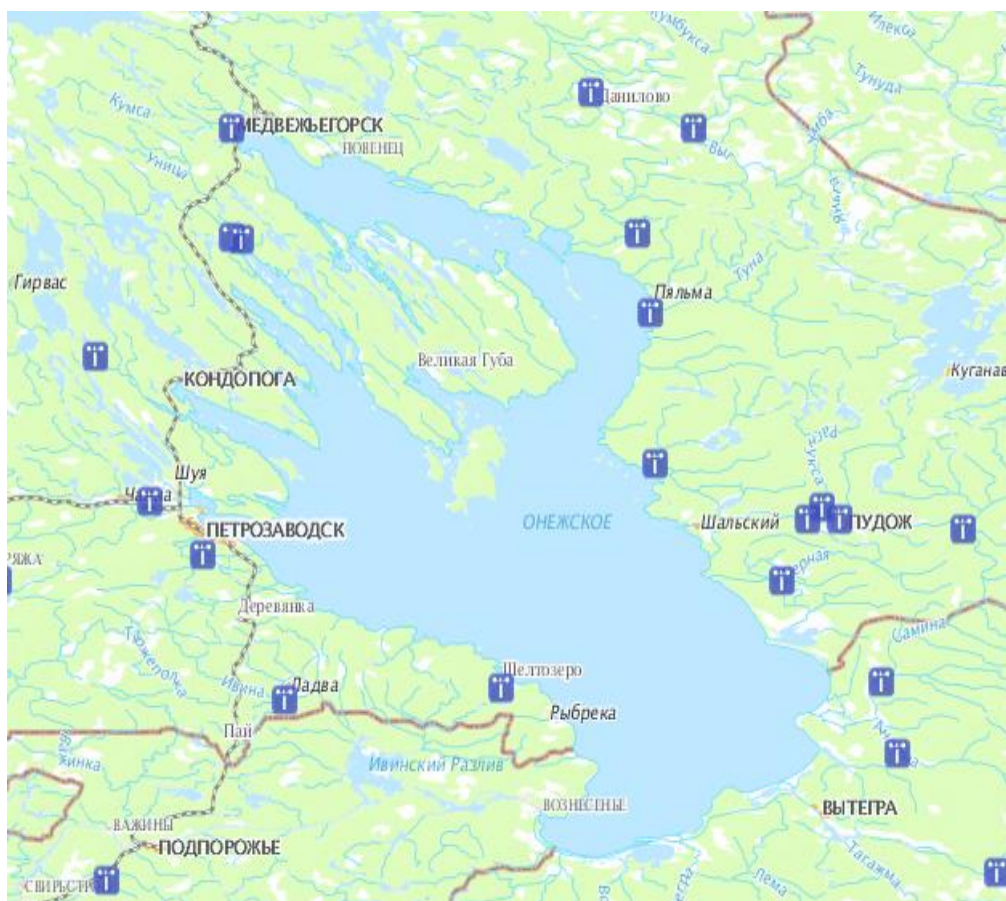


Рисунок 4 – Карта действующих гидрологических постов [7].

3 КЛИМАТ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

3.1 Температурный режим

Онежское озеро расположено на севере умеренного климатического пояса, что сказывается на ярко выраженных погодных условиях. Климат обуславливается в первую очередь широтной зональностью инсоляции, влиянием западного переноса и вторжением арктических воздушных масс. Как следствие, лето в пределах Онежского озера короче чем в центральной части РФ.

Первая половина зимы в данном районе сравнительно мягкая; погода пасмурная и ветреная, часты осадки и оттепели. Вторая половина зимы значительно холоднее первой, нередки метели.

Весной, особенно в первой ее половине, сравнительно теплая погода чередуется с похолоданиями, возможны заморозки и выпадение снега; в это время нередки туманы. Лето прохладное; увеличивается число ясных дней и повторяемость гроз, а во второй половине лета - количество осадков; уменьшается скорость ветра. При вторжениях холодных арктических воздушных масс даже в июле возможны заморозки. Диаграмма количества осадков изображена на рисунке. Осень относительно теплая; преобладает пасмурная погода с обложными дождями или мокрым снегом; увеличиваются число дней с туманами и скорость ветра. Температура и влажность воздуха. В самые холодные месяцы года (январь и февраль) средняя месячная температура воздуха в описываемом районе составляет – 9... 13 °С. Первые морозы в большей части района отмечаются в сентябре, а последние – в конце мая – начале июня. В холодный период в любой из месяцев возможны оттепели, связанные с вторжением теплого и влажного воздуха с Атлантического океана. Абсолютный минимум температуры -45 °С (поселок Вознесенье, январь; порт Медвежьегорск, февраль).

Самым теплым месяцем года является июль, когда средняя месячная температура воздуха составляет 15–17 °С. Абсолютный максимум температуры 35 °С (порт Медвежьегорск, июль). Суточные колебания температуры воздуха наибольшие (8–12 °С) летом, наименьшие (4–6 °С) осенью. Минимум в суточном ходе отмечается утром, а максимум - после полудня. Относительная влажность воздуха на Онежском озере составляет в течение всего года в среднем 80–85 %, на побережье с апреля по июль 65–75 %, а с августа по март 80–90 % [3].

3.2 Осадки

Средняя месячная облачность в описываемом районе составляет с сентября-октября по февраль 7-9 баллов, а с марта по август-сентябрь 5-7 баллов. Среднее годовое число пасмурных дней (облачность 8-10 баллов) составляет 175-200; среднее месячное число таких дней с марта по август-сентябрь изменяется от 10 до 14, а с октября по февраль — от 15 до 24[13]. Больше всего осадков выпадает с июня по сентябрь-октябрь, когда среднее месячное количество их в большинстве пунктов составляет 60-90 мм. Меньше всего осадков отмечается с февраля по апрель, когда среднее месячное количество их не превышает 40 мм. Чаше всего осадки выпадают с сентября по январь-февраль, когда среднее месячное число дней с ними колеблется от 16 до 24. Многолетний график месячных сумм осадков представлен на рисунке 5.

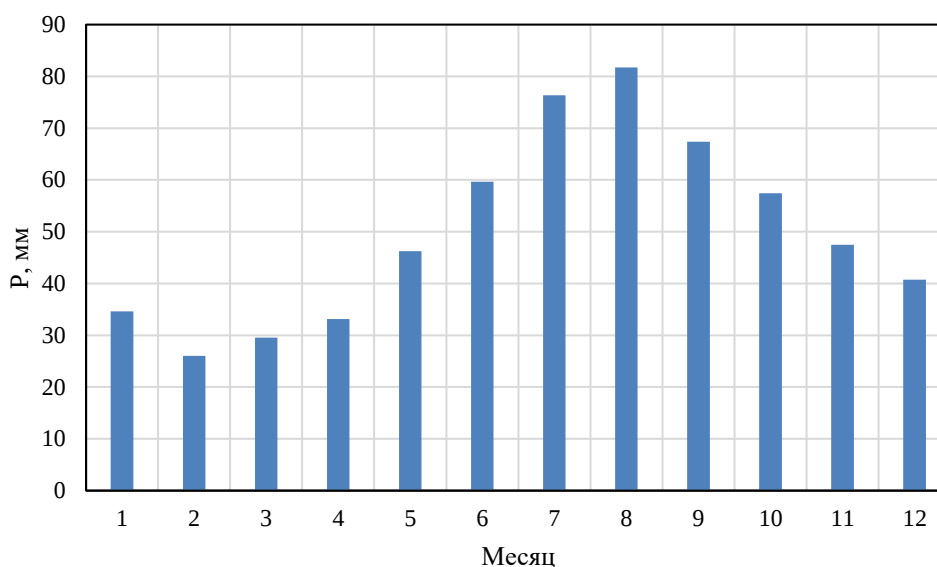


Рисунок 5 – Среднемесячная многолетняя сумма осадков по данным наблюдения на метеостанции Петрозаводск.

3.3 Ветер

На большей части Онежского озера в течении всего года наблюдаются ветра в основном направления ЮВ, ЮЗ, Ю. Также нередки ветра с направлением С и СЗ. Среднемесячная скорость ветра – 3-6 метеостанции. Зимой может возрастать до 9 метеостанции. Повторяемость штилей варьируется в пределах 1%–15%, иногда достигая 20%.

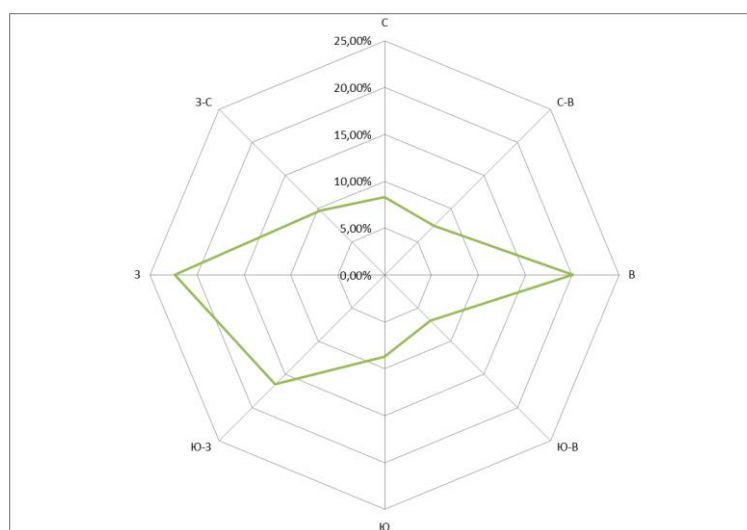


Рисунок 6 – Роза ветров г. Петрозаводск.

4 ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

4.1 Основные сведения

Одним из ключевых факторов формирования термического режима озера является сама морфометрия озера, климат, проточность, минерализация озера. Онежское озеро является сложным по морфометрии и генезису озером, расположено на севере умеренного климатического пояса, что сказывается на режиме. По объему озеро является крупным что делает его крайне инертным водным объектом. Термический режим озера является важным параметром оказывающий влияние не только на местные метеорологические показатели но и на микроклиматические и даже на климатические. Например, пути циклонических систем, по которым проходят западные или атлантические воздействия, также трансформируются во многом из-за Онежского и Ладожского озер. Таким образом можно сделать вывод что исследование термического режима крупных водных объектов таких как Онежское озеро является важным исследованием в рамках понимания климатических процессов. Термический режим определяет собой также и навигационные условия, таким образом изучение режима имеет практическую важность.

Существует несколько классификаций озер по термическому режиму. Выделяют основные группы

- I. Полярные
- II. Субполярные
- III. Умеренные
- IV. Субтропические
- V. Тропические

Как было ранее выявлено, температурный режим Онежского озера в поверхностном слое характеризуется многолетней цикличностью [3]. Помимо этого на температурный режим оказывается влияние сток рек, например река Вытегра и Беломорско-Балтийский канал оказывают влияние на температурный режим воды.

Для краткой характеристики термического режима следует прежде всего понимать сезонные изменения температуры воздуха. Однако известно что на крупных водных объектах выделяют 4 основных термических сезона.



Рисунок 7 – Структура ежегодного цикла формирования и расходования теплового запаса в стратифицированных озерах умеренных широт [5].

1. Период летнего прогревания.

Данному периоду характерна прямая стратификация температуры то есть температура воды имеет наибольшие значения в поверхностном слое и с глубиной уменьшается примерно до 4°C так как вода достигает максимальной плотности при данной температуре. Выделяют основные три слоя распределения температура. Эпилимнион, металимнион и гиполимнион.

2. Период осеннего остывания

При осеннем похолодании озеро начинает отдавать накопленное тепло за лето окружающей среде. Таким образом поверхностные слои водоема начинают быстро остывать, при этом придонные слои удерживают тепло. В таком случае наблюдается гомотермия.

3. Период зимнего остывания

В холодное время наблюдается обратная стратификация т.е температура на дне несколько выше чем на поверхности. Это связано с физическими свойствами воды.

4. Период весеннего прогрева

В данный сезон увеличивается инсоляция и повышается температура воздуха. Водоем начинает прогреваться, забирая тепло из окружающей среды. Наблюдается гомотермия.

Мощность эпилимниона обычно не превышает 10 м. Существует закономерность что при увеличении глубины водоема наблюдается уменьшение мощности эпилимниона. Данная закономерность связана с увеличением объема воды и рассеиванием солнечного света.

Первые экспедиции по исследованию термического режима озера осуществлялись ГГИ.

4.2 Исследование термического режима Онежского озера

Первые попытки описать термический режим Онежского озера предпринимались ещё в конце XIX в. Начиная с 1920-х г. Государственный гидрологический институт начал выполнять экспедиции на озеро для съемки термики. Однако данные были малорепрезентативными по причине того, что они выполнялись в отдельных районах и в разные периоды. Однако сопоставив максимально короткие промежутки дат и близки по ходу станции были восстановлены некоторые профили. Данные профили

восстанавливались с помощью ПО *Surfer*. На рисунке 7 представлен разрез по данным экспедиции ГГИ за период 02.07.1932 – 14.07.1932 гг.

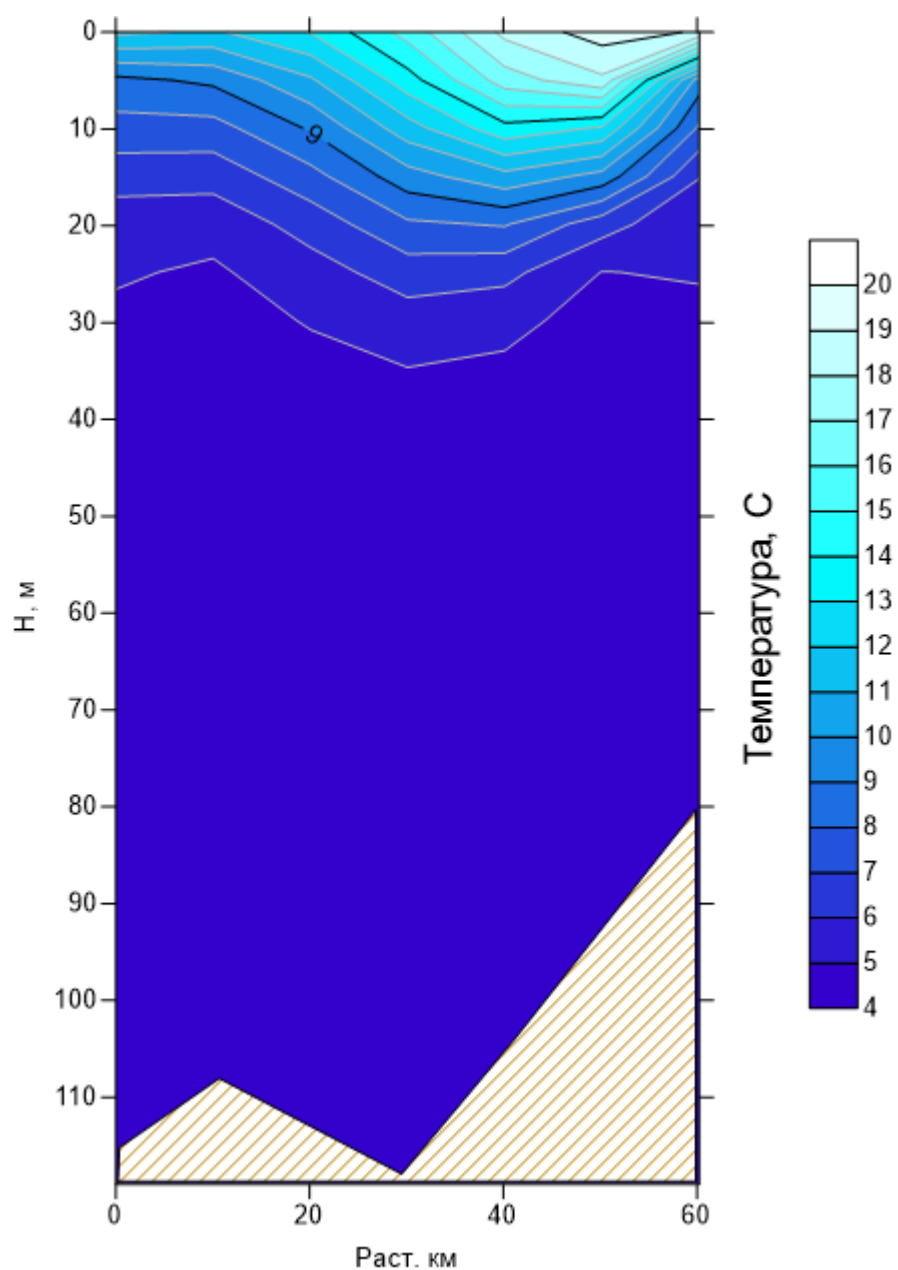


Рисунок 8 – Термический разрез 02.07.–14.07. по координатам съемок проведенных ГГИ.

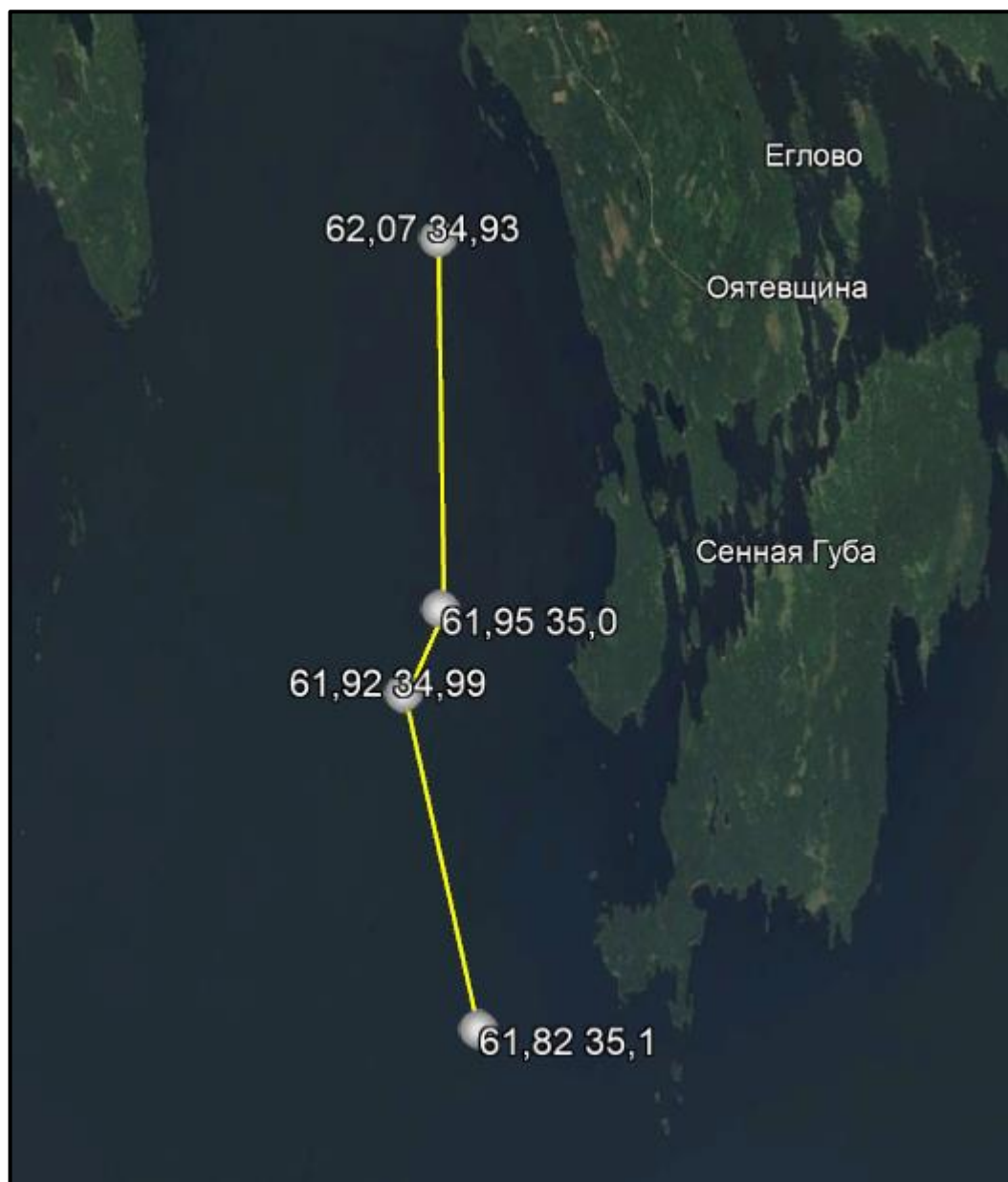


Рисунок 9 – координаты хода съемки ГГИ 1932 г.

В качестве начальной отметки была взята станция с координатами 62,07 с.ш. и 34,93 в.д. до конечной 61,82 с.ш. 35,10 в.д. в направлении с севера на юг.

Анализируя график можно выявить эпилимнион до глубины 10 метров начинающийся на 40 км. Явно выраженную прямую стратификацию. Также заметна обратная зависимость мощности эпилимниона с глубиной. Данный разрез соответствует периоду летнего прогрева.

5 ЛЕДОВЫЙ РЕЖИМ

Ледовые явления наблюдаются только на равнинных водоёмах умеренных и высоких широт, а также на озёрах высокогорных систем. Закономерно повторяющиеся из года в год ледовые явления называются ледовым режимом озера [5].

Для возникновения льда в водоёме необходимо:

- 1) Небольшое переохлаждение воды, т.е. её температура должна быть немного ниже 0°C на $0,001\text{--}0,01^{\circ}\text{C}$ и более;
- 2) Наличие ядер кристаллизации, которыми служат снежинки и льдинки, выпавшие на воду
- 3) Турбулентное перемешивание для отвода выделяющейся при кристаллизации теплоты.

В силу своих морфометрических характеристик, Онежское озеро имеет сложный и неравномерный процесс формирования ледового покрова.

Магистерская диссертация продолжает изучение ледового режима Онежского озера и является продолжением бакалаврской работы. Для более детального изучения рассматриваются также космические снимки спутника *Landsat* и *Sentinel*.

В качестве сравнения разницы ледовой обстановки показаны два снимка за одну дату разницей в 9 лет. Как можно отметить, на рисунке 8 озера открыто на 75–80 %. Лёд сконцентрирован в северо-восточной части озера и вдоль восточного побережья. Однако по снимку видно, что он имеет нарушенную структуру.

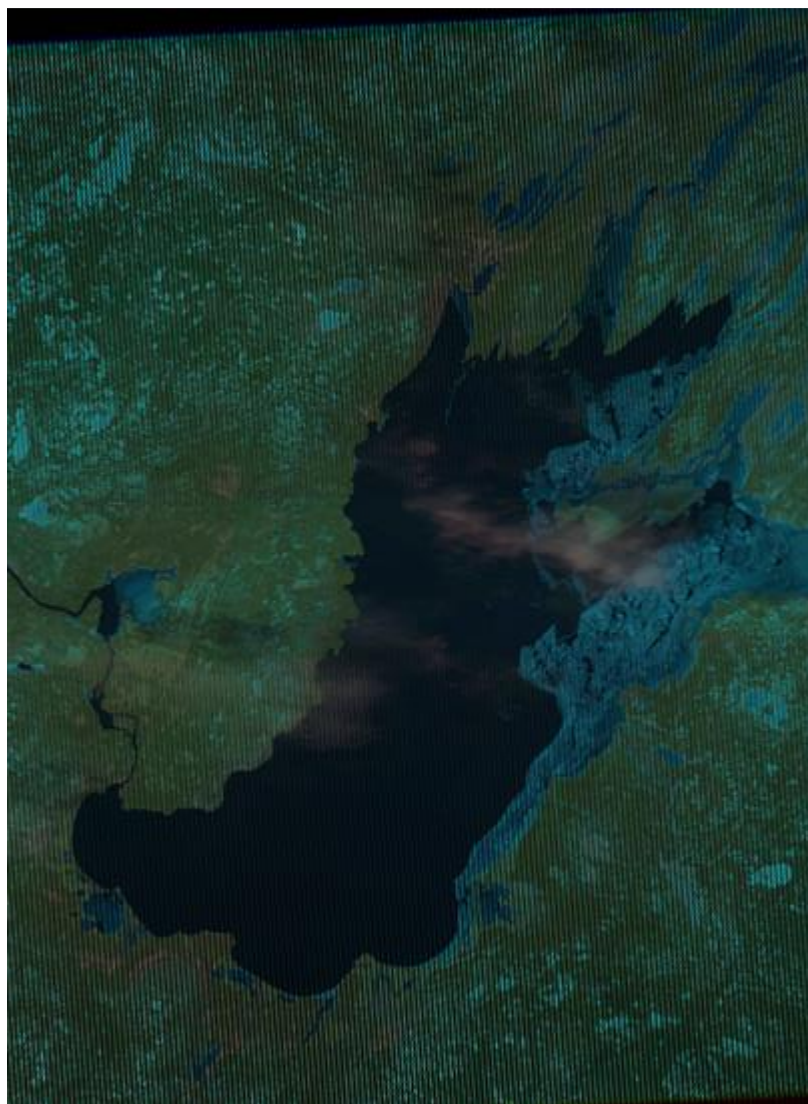


Рисунок 10 – Снимок ледовой обстановки за 17.03.2020 г.

На рисунке 9 представлена ситуация полного покрытия озера ледовым покровом. Согласно данным толщина льда в марте 2011 года составляла от 50 до 75 см. Наибольшая наблюдалась в Медвежьегорске (76 см) – самом северном пункте, наименьшая – в Кондопоге (58 см).



Рисунок 11 – Снимок ледовой обстановки за 17.03.2011.

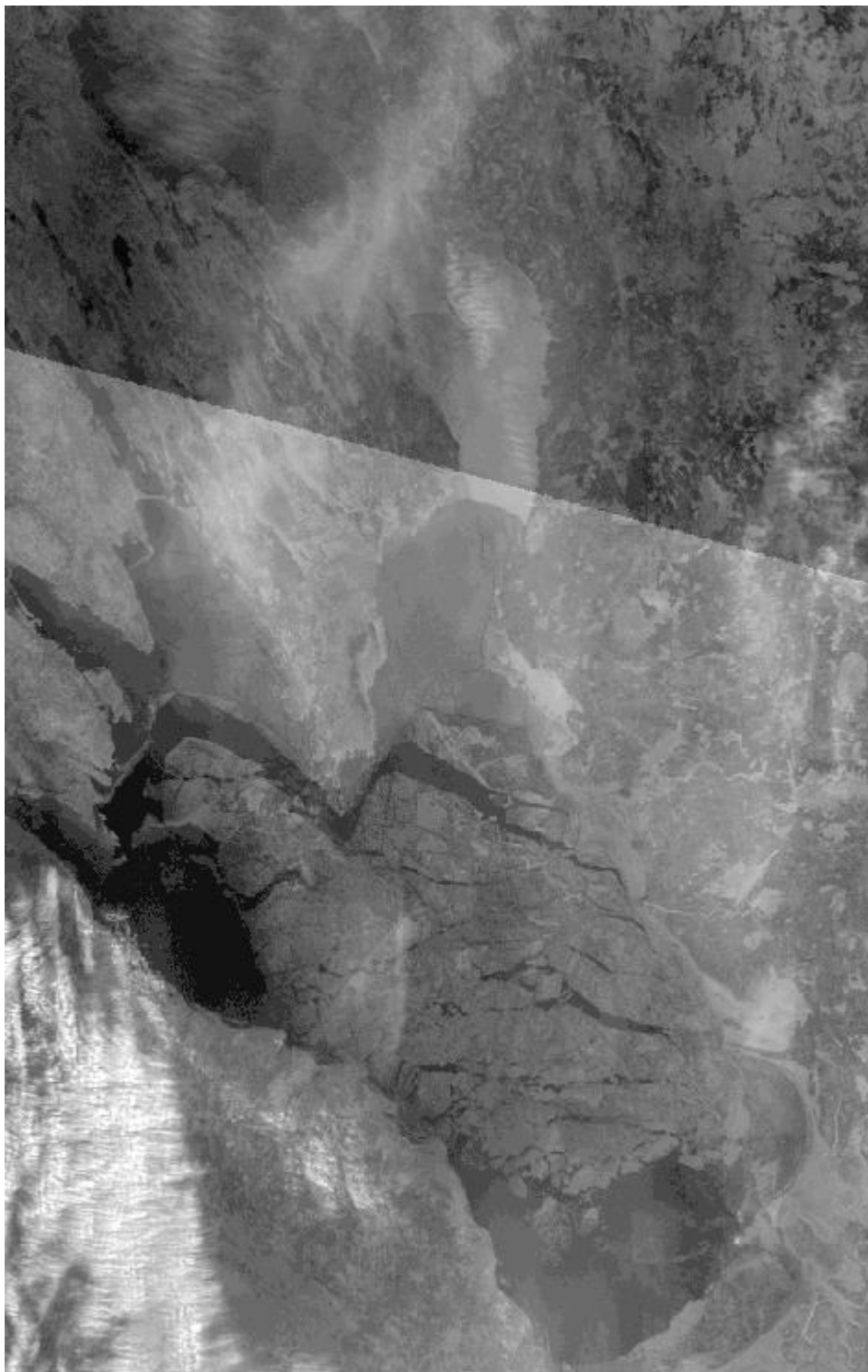


Рисунок 12 – Комбинированный снимок ледовой обстановки за
09.02.1992 г.

На рисунке 11 зафиксирована ранняя зимняя оттепель, которая послужила началу разрушения льда на озере. Наблюдается характерная закономерность – южная, более мелкая часть озера освобождается ото льда быстрее нежели северная.

Напротив на рисунке 13 представлена ситуация за февраль 1985 г. На снимке отчетливо видно что вся поверхность (за исключением не видимого Повенецкого залива) Онежского озера покрыта льдом.

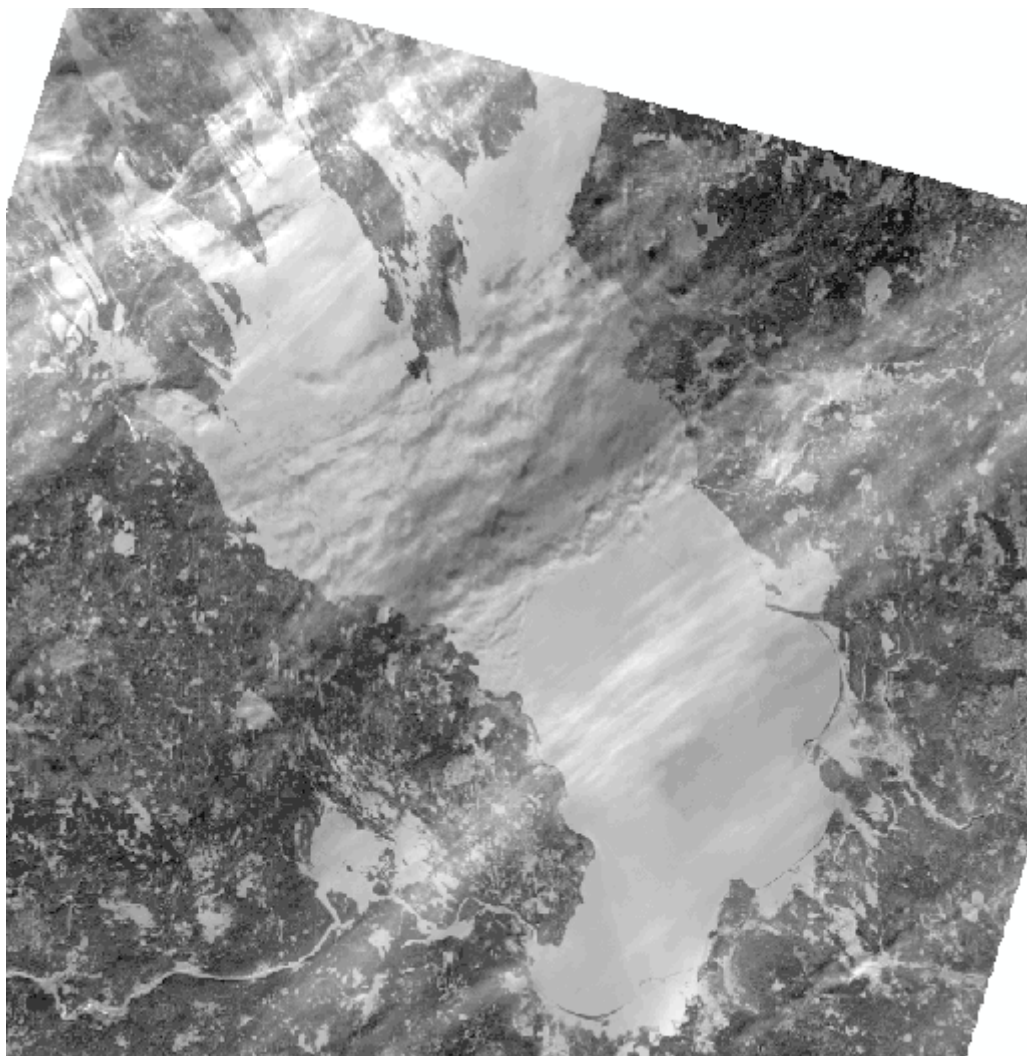


Рисунок 13 – Космический снимок ледовой обстановки за 05.02.1985 г.

К факторам, определяющим возможности образования ледовых явлений на акватории обычно относят [5].

- 1) Интенсивность отдачи в атмосферу теплоты с акватории водоёма в осенне-зимний период охлаждения
- 2) Величину теплозапаса в озере. Чем больше объём водной массы и чем глубже озеро тем более долгий срок занимает выхолаживание.
- 3) Интенсивность перемешивания, связанная с транзитными течениями.

6 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЛЕДОВЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ОНЕЖСКОМ ОЗЕРЕ

6.1 Введение в прогнозирование ледовой обстановки

Ледяной покров играет важную роль в зимних процессах на озёрах. Наличие ледяного покрова препятствует переносу скрытого и явного тепла из озера в атмосферу, что влияет на температуру поверхности озера, уровень воды и гидрометеорологические явления. Ледяной покров также изменяет перенос импульса между воздухом и водой, что влияет на течения и волны.

Ледяной покров на водохранилище образуется по определённом порядку. Начиная с мелководья, наблюдается зависимость сроков установления льда на поверхности с глубиной водоёма [11].

В прогнозировании ледового и термического режима озёр стоит отталкиваться от балансового метода прогнозирования ледовых явлений

Время начала ледообразования определяется как момент, когда выполняется следующие условие:

$$\vartheta_n \leq -B_n/a_n, \quad (1)$$

где

ϑ_n — время, за которое происходит образование льда при заданных условиях.

B_n — тепловой баланс поверхности воды (Вт/м^2 или Дж/м^2), характеризующий потерю тепла.

Если $B_n < 0$, вода охлаждается.

a_n — коэффициент теплоотдачи ($\text{Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$ или $\text{Дж/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{сут)}$), зависящий от:

- а) Скорости ветра,
- б) Влажности воздуха,
- с) Разницы температур воды и воздуха.

6.2 Основные принципы прогнозирования ледовых явлений

Прогнозирование ледовых явлений основано на учете взаимодействия термического режима воды, метеорологических условий и гидродинамических факторов. Главными параметрами, влияющими на образование и разрушение льда, являются:

1. Температура воздуха;
2. Температура воды на различных глубинах;
3. Скорость и направление ветра;
4. Интенсивность солнечной радиации;
5. Гидрологические характеристики (сток и течения).

Формирование льда начинается, когда температура воды достигает точки замерзания, а поступление тепла от экзогенных и эндогенных источников становится недостаточным для её удерживания и дальнейшего нагревания. По физическим характеристикам вода имеет одну из больших теплоёмкостей. В силу этого вода не замерзает во всю толщу, сохраняя гомотермию в глубоких районах.

Математическое описание процессов замерзания воды и роста льда обычно включает уравнение теплового баланса на поверхности озера и в его толще.

6.3 Математические модели прогнозирования ледовых явлений

6.3.1 Эмпирические модели

Ледовый режим, как было рассмотрено, выше сильно зависит от климатических условий, в частности, все основные фазы ледового режима начинаются с накоплением определенной суммы отрицательных или положительных температур в зависимости от водности. Эмпирические

модели основаны на статистической обработке данных многолетних наблюдений и использовании регрессионного анализа. Например, зависимость даты начала ледостава от температуры воздуха может быть представлена уравнением (2).

$$h_{л} = \varphi \left(\sum_0^{\tau} \theta_2 \right)^n \quad (2)$$

где $h_{л}$ – толщина ледяного покрова;

$\sum_0^{\tau} \theta_2$ – сумма средних суточных температур воздуха на высоте 2 м за

период τ от начала образования ледяного покрова;

φ и n – эмпирические коэффициенты.

Датой начала ледостава принято считать первый день образования на водоеме неподвижного ледяного покрова.

Преимущество эмпирических моделей – простота реализации и низкие вычислительные затраты. Однако такие модели ограничены условиями, в которых были собраны данные, и плохо адаптируются к изменяющимся климатическим условиям. Данная модель опирается на зависимость ретроспективных данных между суммой отрицательных температур и толщиной льда.

6.3.2 Физико-математические модели

Физико-математические модели описывают процессы образования и разрушения льда на основе уравнений теплопередачи и гидродинамики.

Основное уравнение расчета толщины льда (3)

$$h_{л} = -\frac{\lambda_{л}}{\alpha_{л}} + \sqrt{\left(\frac{\lambda_{л}}{\alpha_{л}}\right)^2 + h_{л_0}^2 + 2h_{л_0} \frac{\lambda_{л}}{\alpha_{л}} - \frac{2\theta_2 \lambda_{л}}{L_{кр}\rho} (\tau - \tau_0)} \quad (3)$$

где $h_{л0}$ — начальная толщина льда;
 $\bar{t}$ — среднее значение температуры декады;
 $\lambda_{л}$ — коэффициент теплопроводности льда;
 $(\tau - \tau_0)$ — расчетный период;
 $L_{кр}$ — удельная теплота ледообразования;
 ρ — плотность льда.

Глубина промерзания воды определяется балансом тепловых потоков и зависит от накопления отрицательных температур в слое льда.

7 СПУТНИКОВЫЕ ДАННЫЕ И МОДЕЛИ

В последние десятилетия получили развитие модели, основанные на данных дистанционного зондирования. Спутники *Landsat*, *Sentinel* и *Terra MODIS* предоставляют снимки, позволяющие анализировать ледовый покров и его динамику. На рисунке 14 показана хронологическая шкала периода работы спутников серии *Landsat*.



Рисунок 14 – Временная шкала периода работы серии спутников *Landsat*.

7.1 Отбор данных для обработки

Для Онежского озера перспективным является интеграция физико-математических моделей с данными спутникового мониторинга. Использование многолетних данных о температуре воздуха, толщине льда и площади покрытия позволяет калибровать модели и учитывать региональные особенности.

На настоящий момент спутниковые технологии активно применяются для оценки количественных характеристик морского льда высокоширотных зон. Однако, данные методики полагаются на океанологические процессы,

которые имеют отличие от озёрных (плотность воды, солёность, течения, структура льда).

Исследуется период с 1990–2024 г. Используется данные космического зондирования *Landsat* сервисами *USGS*. Спутниковые снимки отбирались по нескольким критериям:

1. Облачность менее 30 % от разрешения снимка
2. Отбор только с января–апрель, октябрь–декабрь
3. Период с 1980–2020 г.
4. Канал B5
5. Наиболее информативным спутником является Landsat 5.

Канал B5 (ближний инфракрасный диапазон, *NIR*) был выбран в качестве ключевого инструмента для классификации льда и воды на космических снимках по следующим причинам:

1. Спектральные особенности воды и льда

В ближнем инфракрасном диапазоне (0,85–0,88 мкм) вода обладает высокой поглощающей способностью, что приводит к низким значениям яркости в этом канале. В отличие от воды, лед и снег демонстрируют значительную отражательную способность из-за своей кристаллической структуры и отсутствия жидкой фазы. Это создает четкий контраст между водными и ледовыми объектами, что критически важно для автоматизированной классификации.

2. Устойчивость к атмосферным искажениям

Канал B5 менее подвержен влиянию атмосферного рассеяния (например, эффекта Релея) по сравнению с видимыми каналами (синий, зеленый). Это повышает точность классификации, особенно в условиях дымки или легкой облачности.

3. Активное применение канала в других методиках

Канал В5 активно используется в расчете индексов, таких как:
NDWI (Normalized Difference Water Index), *NDSI (Normalized Difference Snow Index)*

Таблица 3 – характеристики каналов спутников *Landsat*

Спектральный канал	Длины волн, мкм	Разрешение (размер 1 пикселя)
Диапазоны <i>OLI (Operational Land Imager)</i>		
Канал 1 Побережья и аэрозоли (<i>Coastal / Aerosol, New Deep Blue</i>)	0,433 – 0,453	30 м
Канал 2 – Синий (<i>Blue</i>)	0,450 – 0,515	30 м
Канал 3 – Зелёный (<i>Green</i>)	0,525 – 0,600	30 м
Канал 4 – Красный (<i>Red</i>)	0,630 – 0,680	30 м
Канал 5 – Ближний ИК (<i>Near Infrared, NIR</i>)	0,845 – 0,885	30 м
Канал 6 – Ближний ИК (<i>Short Wavelength Infrared, SWIR 2</i>)	1,560 – 1,660	30 м
Канал 7 – Ближний ИК (<i>Short Wavelength Infrared, SWIR 3</i>)	2,100 – 2,300	30 м
Канал 8 – Панхроматический (<i>Panchromatic, PAN</i>)	0,500 – 0,680	15 м
Канал 9 – Перистые облака (<i>Cirrus, SWIR</i>)	1,360 – 1,390	30 м
Диапазоны <i>TIRS (Thermal Infrared Sensor)</i>		
Канал 10 – Дальний ИК (<i>Long Wavelength Infrared, TIR1</i>)	10,30 – 11,30	100 м
Канал 11 – Дальний ИК (<i>Long Wavelength Infrared, TIR2</i>)	11,50 – 12,5	100 м

Космические снимки скачивались с сервиса *USGS*. Сервис позволяет бесплатно скачивать снимки различных каналов на произвольной

территории. Выбор территории осуществляется через полигонометрию. Файлы скачивались в расширении *TIF*, что хорошо подходит для работы с ГИС.

7.2 Методика обработки космических файлов

В качестве программы для обработки космических снимков была выбрана программа *ArcMap* (*ArcGIS*) версия 10.5. Данный выбор обусловлен широким набором инструментов программы, а также построением автоматизированных алгоритмов (*ModelBuilder*).

7.2.1 Создание алгоритма обработки

Для повышения эффективности обработки данных с помощью инструмента *ModelBuilder* был построен алгоритм обработки космических снимков, представленный на рисунке 15. Алгоритм был основан на расчетах показателя *NDWI*.

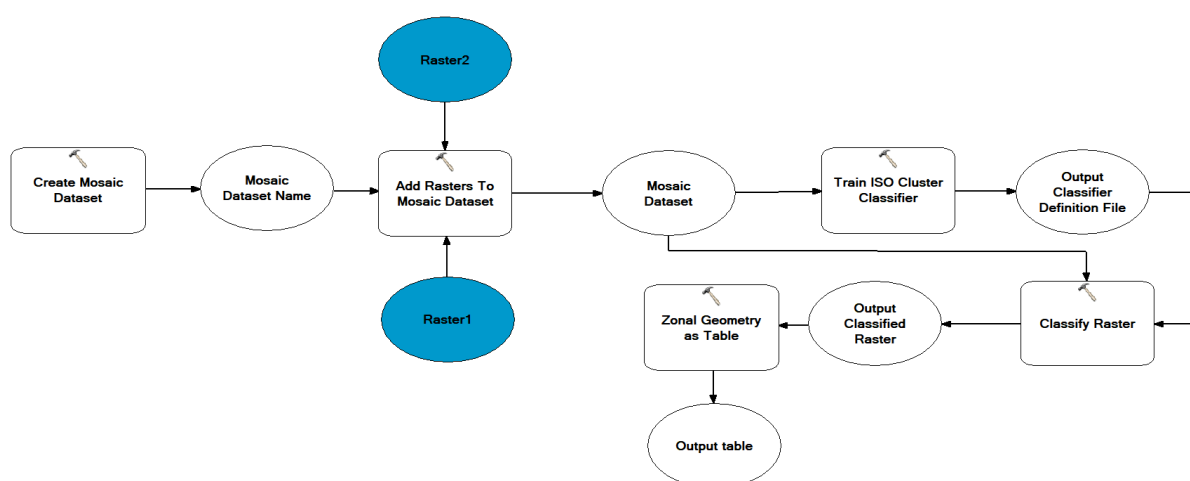


Рисунок 15 – Автоматизированный алгоритм обработки.

Данный алгоритм состоит из следующих компонентов:

1. *Create Mosaic Dataset* – создание сетки для дальнейшего размещения на ней объединения нескольких растровых изображений в единый виртуальный слой для удобства обработки. Данный инструмент был введён в алгоритм по причине недостаточного территориального охвата спутниковым снимком территории и использовании двух и более снимков.
2. *Add Rasters To Mosaic Dataset* – добавление разных растров на мозаику созданную в предыдущем шаге.
3. *Train ISO Cluster Classifier* – кластеризация пикселей на основе спектральных характеристик. Изображен на рисунке 11.
4. *Output Classifier Definition File* – экспорт настроек модели обучения для последующего использования на других растрах.
5. *Classify Raster* – применение обученной модели к новым данным нового растра.
6. *Zonal Geometry as Table* – вынос геометрических данных в атрибутивную таблицу.

На рисунке 17 изображен результат кластеризации участка Онежского озера (10 классов). Зелёным цветом выделены участки с полноценным перекрытием льда. Синий – частичное перекрытие. Тёмно синим – вода свободная ото льда.

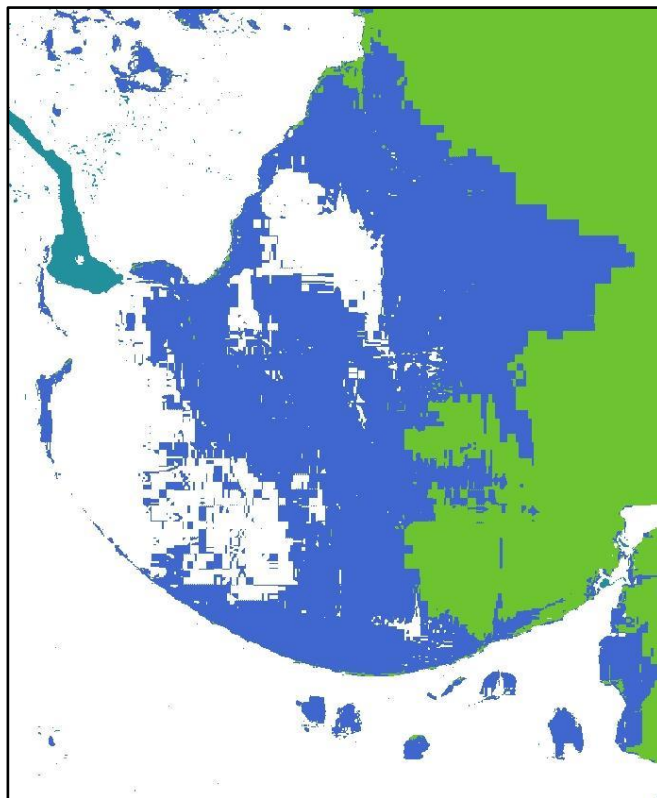


Рисунок 16 – Кластеризация участка озера.

На рисунке 16 также изображен результат кластеризации (20 кластеров). Насыщенным синим, выделены участки с открытой водой. Красным указаны зоны с участками покрытыми льдами, зеленый, светло-синий частичное покрытие льда.

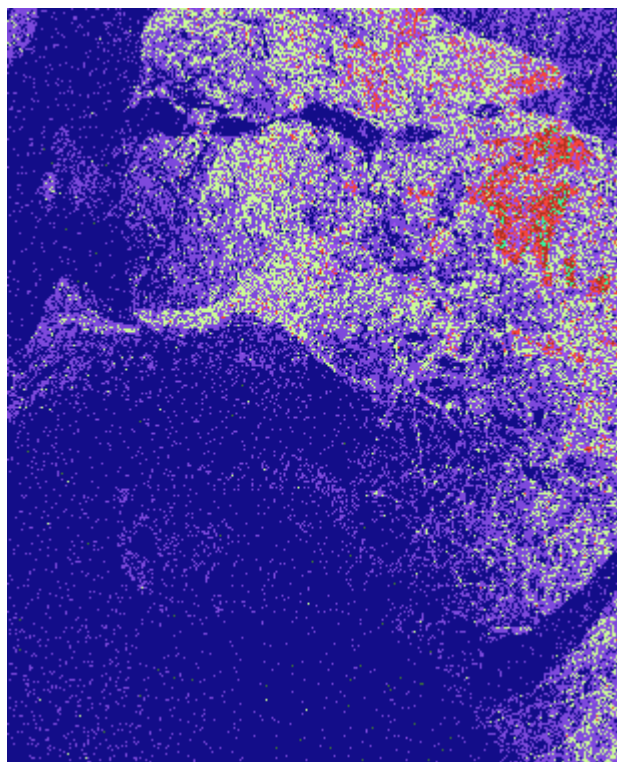


Рисунок 17 – Кластеризация участка озера с большим количеством классов.

Выбор разного количества кластеров для обучения обусловлен различной состоянием качества снимка и состоянием льда. На снимках со сложной ледовой обстановкой (рисунок 17) применялось большее количество спектров для охватывания более сложных участков.

После обработки снимка конечным результатом является преобразование площади класса в атрибутивную таблицу (рисунок 18).

Table



ZonalGe_LC08_L11

	OBJECTID *	VALUE	AREA	PERIMETER	THICKNESS	XCENTROID	YCENTROID	MAJORAXIS	MINORAXIS	ORIENTATION
	1	0	2519594	2487528	37,15899	4993,331	-4258,106	977,4102	820,5477	74,03235
	2	1	2631075	4209832	16,121	4504,781	-4330,742	961,2188	871,2867	80,77277
	3	2	7665561	7016458	21,019	4525,307	-4147,357	1699,729	1435,537	82,59048
	4	3	5888440	4295404	23,675	4315,424	-4445,604	1405,944	1333,16	60,96244
	5	4	3338866	4230518	55,22899	4232,35	-4258,993	1075,553	988,1371	39,61924
	6	5	2620413	1210630	106,821	2729,76	-3481,283	1032,153	808,1199	102,1527
	7	6	6814414	875008	496,7993	3102,714	-4189,122	1605,683	1350,886	146,7002
	8	7	4327544	5779526	29,675	4505,83	-4285,208	1270,831	1083,937	54,99899
	9	8	5461820	6454304	17,535	4588,895	-4056,919	1433,494	1212,807	71,95471
	10	9	428594	441410	22,363	4680,221	-4797,787	404,726	337,0817	163,7776

Рисунок 18 – Атрибутивная таблица.

Получившиеся данные помогают оценить площадь ледовой поверхности от общей площади водоёма. Для этого в самом начале обработки снимков производится кластеризация «чистого озера» для вычисления площади.

Вычисление производилось по формуле:

$$\%_{\text{лед.пов.}} = \frac{S_{\text{льда}}}{S_{\text{общ}}} \quad (4)$$

Конечным результатом является составление сводной таблицы (приложение А).

7.3 Исследование наземных данных толщины льда и температуры воздуха

На Онежском озере, как и полагается на любом крупном водном объекте расположено несколько гидрологических (озерных) постов. Для исследования ледо-термического режима озера берутся во внимание только наиболее характерные посты (шхеры, острова, мелководная южная часть). Источниками данных являются гидрологические ежегодники ГГИ и архивные данные электронных ресурсов АИС ГМВО и “Погода и Климат”. На рисунке 19 изображена схема расположения метеостанций (треугольник) и озерных постов (круг).

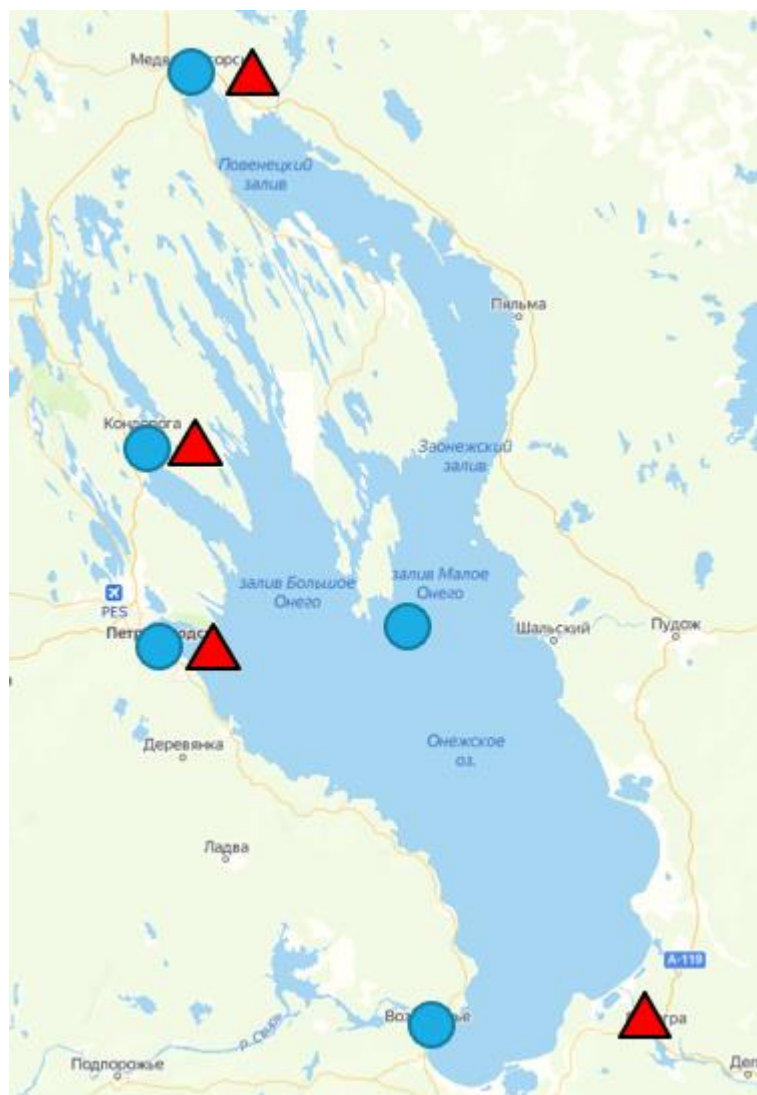


Рисунок 19 – Схема расположения озерных постов и метеорологических станций.

Таблица 4 – Характеристики метеорологических станций

Индекс ВМО	Название	Высота над ур. Моря	Период наблюдений
2282	Петрозаводск	111	1875 – наст. вр.
22721	Медвежьегорск	38	н/д
22727	Кондопога	81	1925 – наст. вр.
22837	Вытегра	56	1876 – наст. вр.

Онежское озеро находится в зоне умеренного климата. Зимы длинные и холодные, а лета короткие и прохладные. Средняя температура января составляет -10°C , а июля – $+15^{\circ}\text{C}$. Количество осадков в год составляет около 600 мм. В зимний период на озере образуется лёд, который сохраняется до конца апреля. Ледовый покров достигает толщины до 1 метра. В качестве исходных данных используются данные о среднемесячных температурах по метеостанциям «Петрозаводск», «Кондопога», «Медвежьегорск» и «Вытегра». Проведён сравнительный анализ трендов среднегодовых значений температуры воздуха периода, с 1950 по 2020г.

Для оценки климатических изменений в связи с рекомендациями Всемирной метеорологической организации [IPCC, 2001] исходный ряд был разбит на две половины продолжительностью более 30 лет: первый период с 1950 по 1990г. И второй период с 1990 по 2020г. Для достижения совместимости ряды перекрывались на два года. Однородность двух половин ряда оценивалась при помощи критерия Стьюдента. Для определения дат начала изменений средней годовой температуры воздуха были построены интегральные кривые по данным наблюдений.

По среднегодовым значениям температур воздуха за весь период и отдельно для первого периода (1950 – 1988гг) и второго периода (1988 – 2020гг), представленные в табл. 1, видно, что они статистически отличаются (второй период больше значим, выше по средним значениям, меньше среднеквадратичное отклонение и дисперсия) среднегодовые значения первого и второго периодов по всем метеостанциям. До 1988 года тренд значений температур на всех станциях статистически не значим. После 1988 – значим. На рисунках 1-4 представлены графики среднегодовых температур по метеостанциям с разбивкой на два периода.

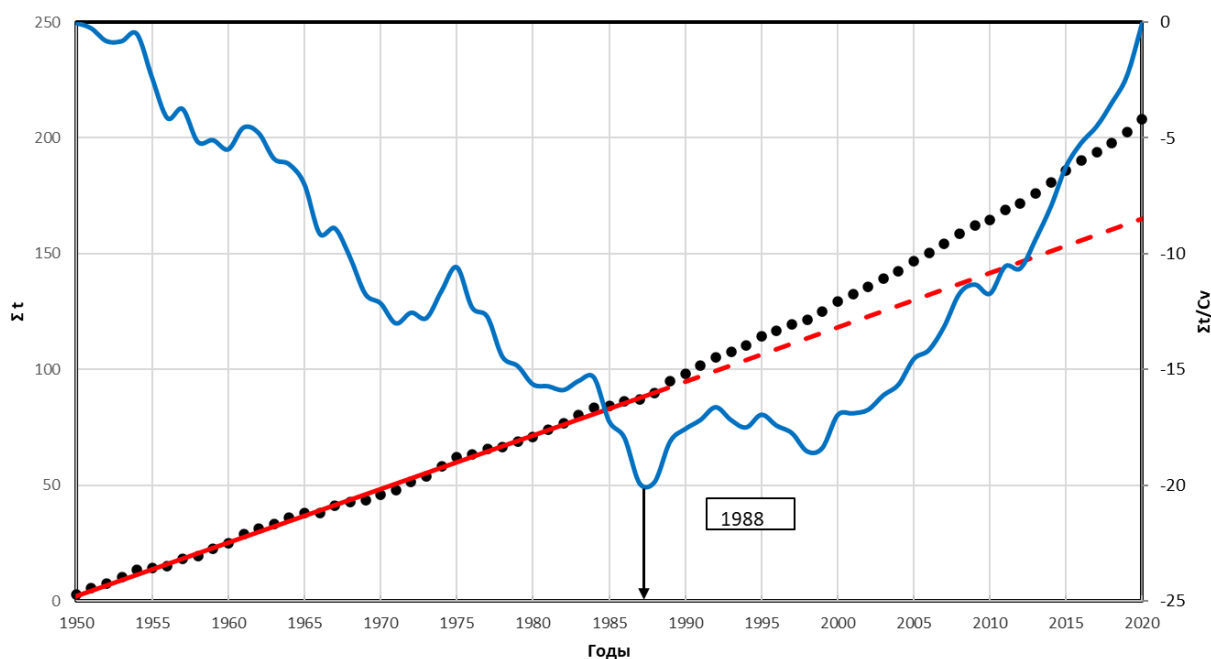


Рисунок 20 – Интегральная кривая по ряду данных среднегодовой температуры воздуха на метеостанции Петрозаводск.

В результате построения разностно-интегральной кривой и интегральной кривой выявлен год изменения температурного режима. На данной метеостанции это 1988 год.

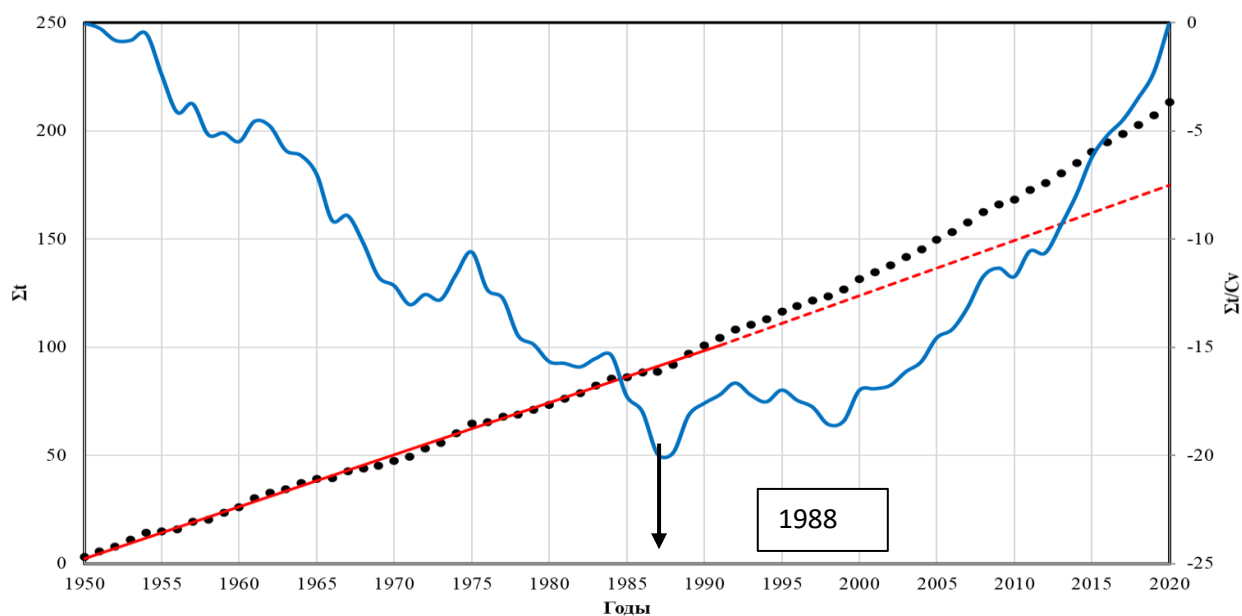


Рисунок 21 – Интегральная кривая по ряду данных среднегодовой температуры на метеостанции Медвежьегорск.

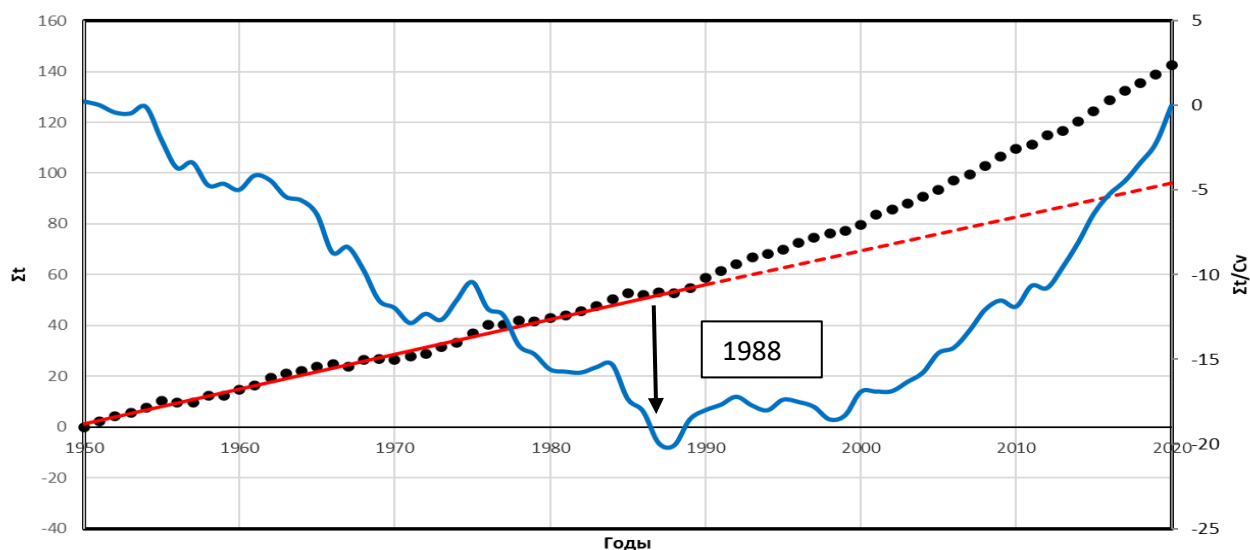


Рисунок 22 – Интегральная кривая по ряду данных среднегодовой температуры воздуха на метеостанции Кондопога.

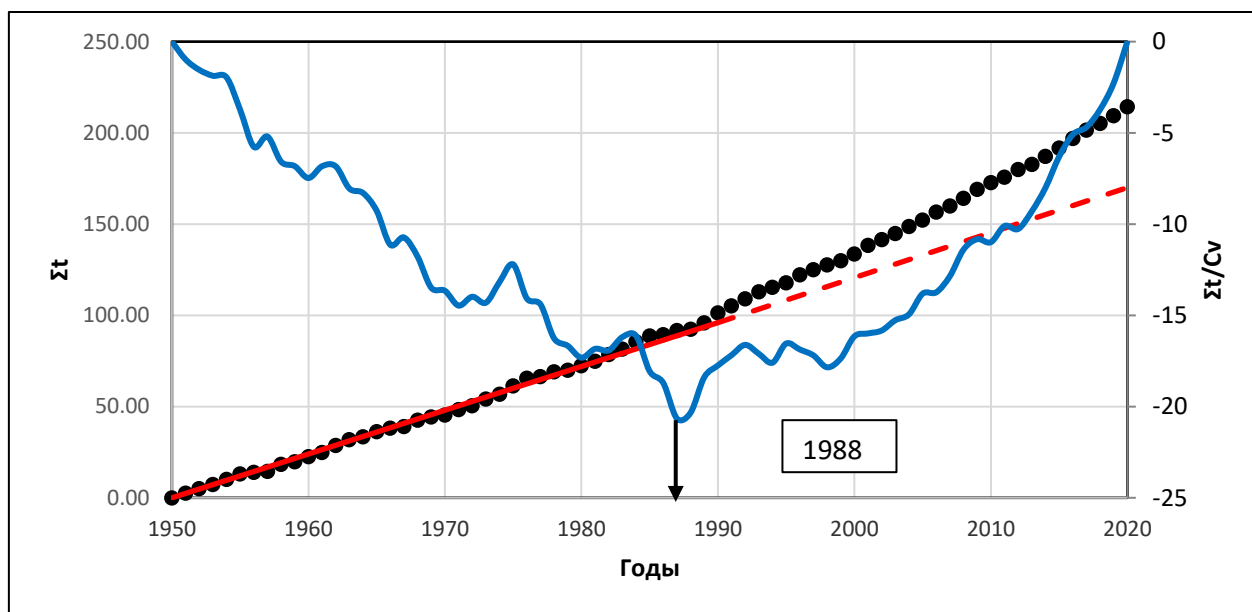


Рисунок 23 – Интегральная кривая по ряду данных среднегодовой температуры воздуха на метеостанции Вытегра

В результате построения двух графиков выделяются два периода с переходом в 1997 году что позже на 9 лет перехода на остальных станциях. Вполне возможно, что это связано с тем, что метеостанция Вытегра находится на удалении 13 км от береговой линии Онежского озера. В выше представленных графиках хорошо выделяются два периода:

квазистационарный период (до 88 года) и период с характерным трендом на повышение среднегодовой температуры (с 88 года). Статистические данные двух периодов представлены в таблицах 2 – 4. Далее построены хронологические графики среднегодовой температуры, а также температуры за тёплый и холодный период года по метеостанциям.

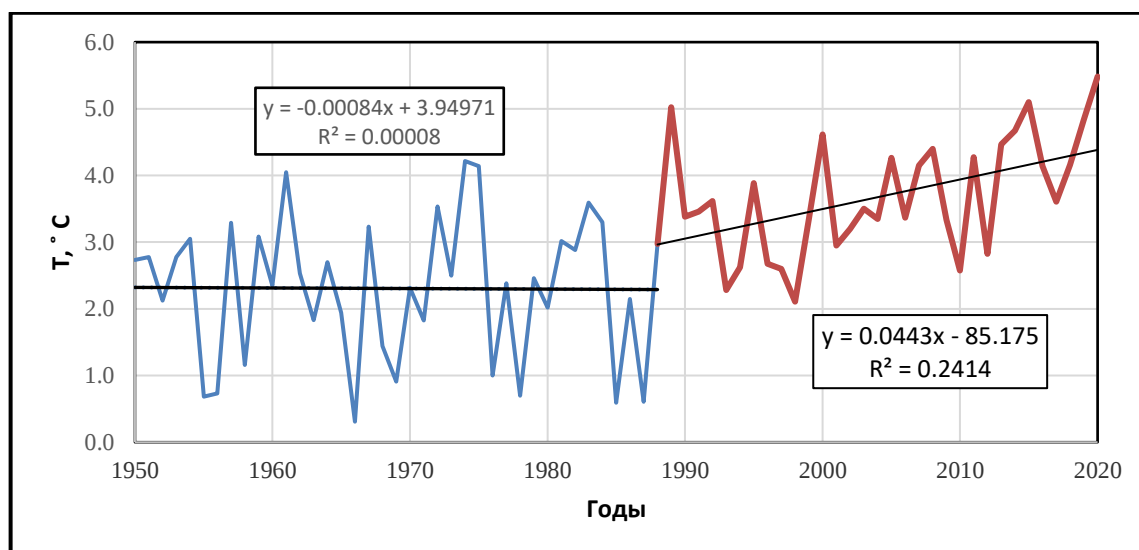


Рисунок 24 – Среднегодовая температура воздуха по метеостанции Петрозаводск.

На рисунке 23 виден квазистационарный период с 1950 по 1988 год. Затем наблюдается тренд на повышение среднегодовой температуры воздуха.

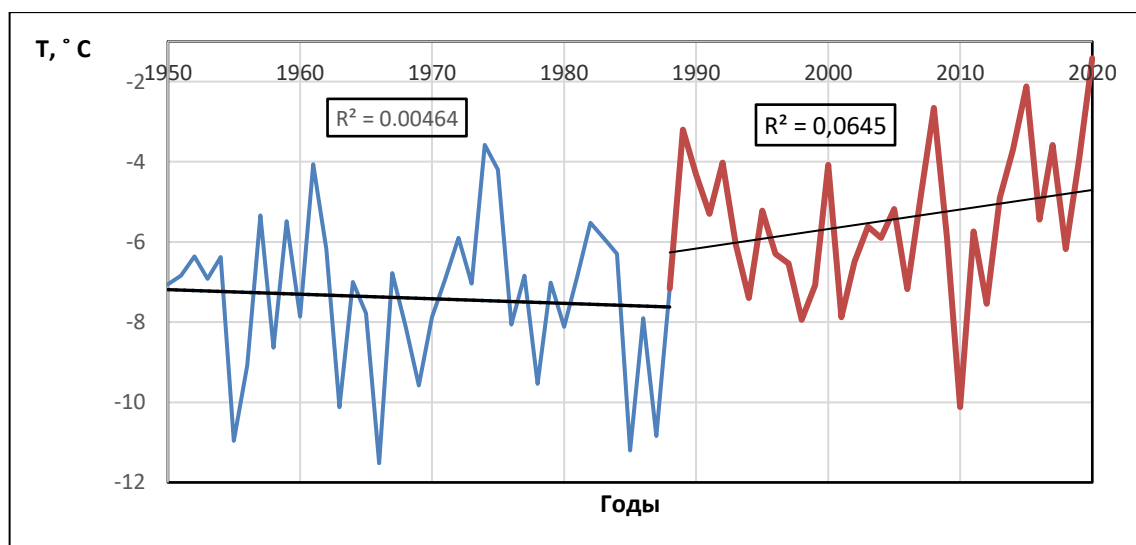


Рисунок 25 – Средняя температура воздуха за холодный период на метеостанции Петрозаводск.

По рисунку 20 можно сделать вывод, что до 1988 года средняя температура за холодный период незначительно понижалась. Затем стала возрастать.

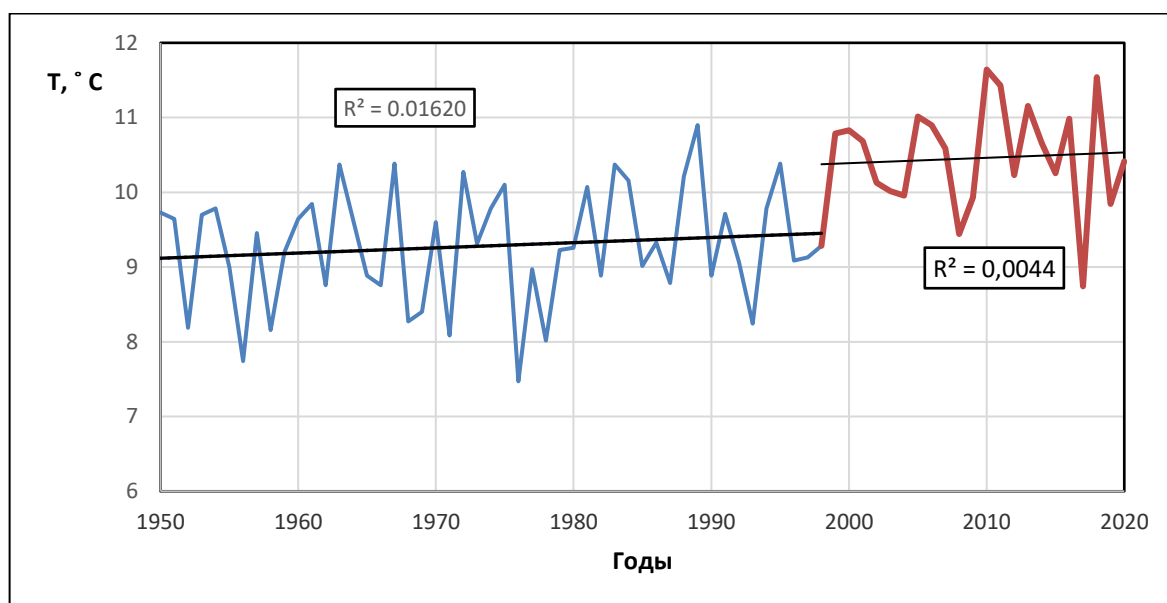


Рисунок 26 – Средняя температура воздуха за теплый период года на метеостанции Петрозаводск.

По рисунку 26 можно сделать вывод, что температура воздуха в теплый период повышалась на протяжении всего периода. В 1997 году произошел резкое повышение температуры при этом сохранив прежнюю скорость потепления.

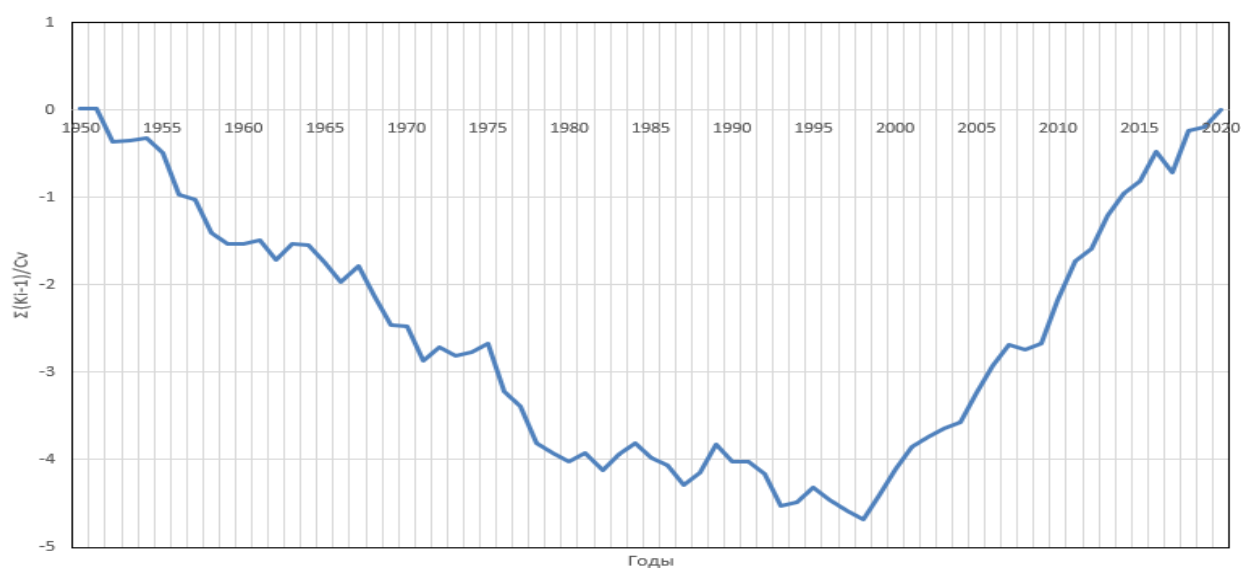


Рисунок 27 – Разностно-интегральная кривая средней температура воздуха за теплый период на метеостанции Петрозаводск.

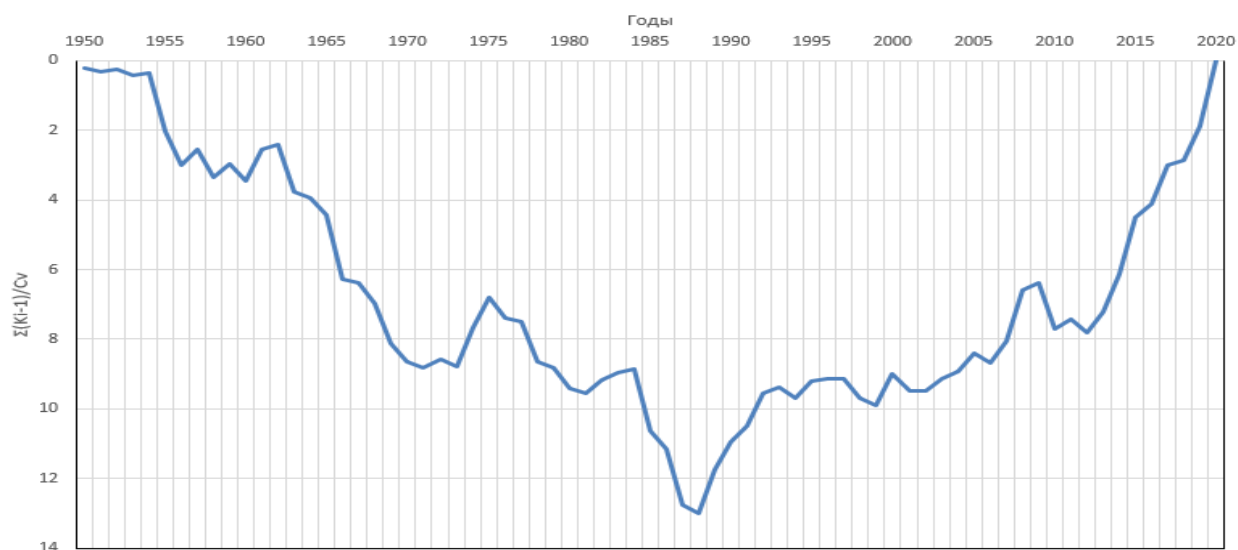


Рисунок 28 – Разностно-интегральная кривая средней температура воздуха за холодный период на метеостанции Петрозаводск.

По рисункам 29 наглядно видно, что средняя температура воздуха за теплый период года стала повышаться на 10 лет позже.

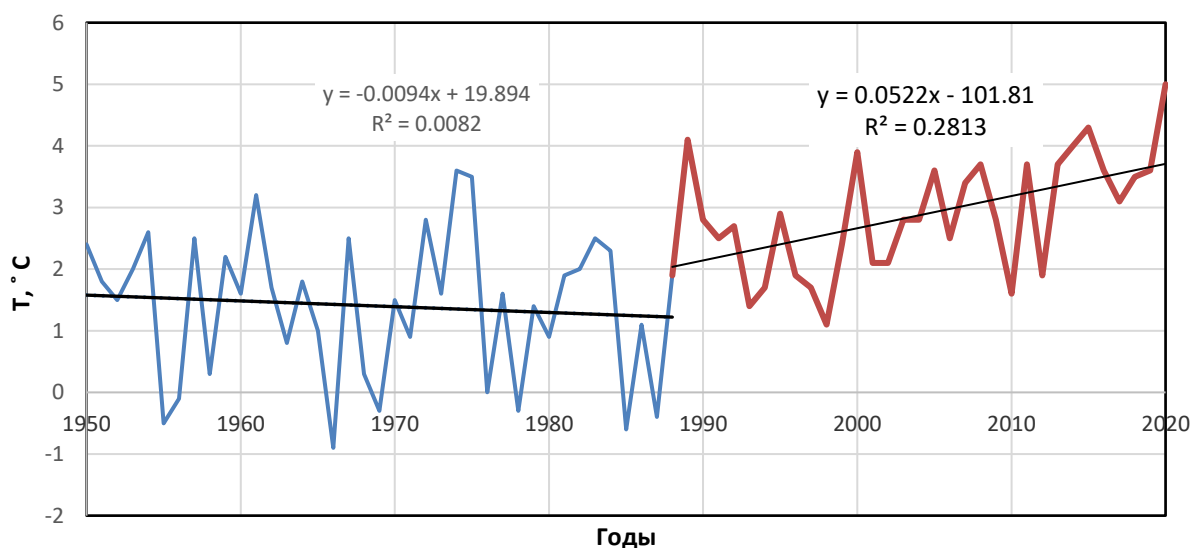


Рисунок 30 – Среднегодовая температура воздуха по метеостанции «Медвежьегорск».

Как видно по рисунку 30 до 1988 годы среднегодовая температура воздуха снижалась (что характерно только для Медвежьегорска из всех выбранных метеостанций). К 1990 году температура резко возросла, однако, если посмотреть на поздние годы, то можно заметить, что у графика температуры воздуха можно выявить некоторые закономерности. Примерно каждые 8 лет происходит повышение температуры, которая чередуется с понижением. Но в 90-м году не произошло достаточно сильного понижение температуры в следствии чего средняя температура стала выше.

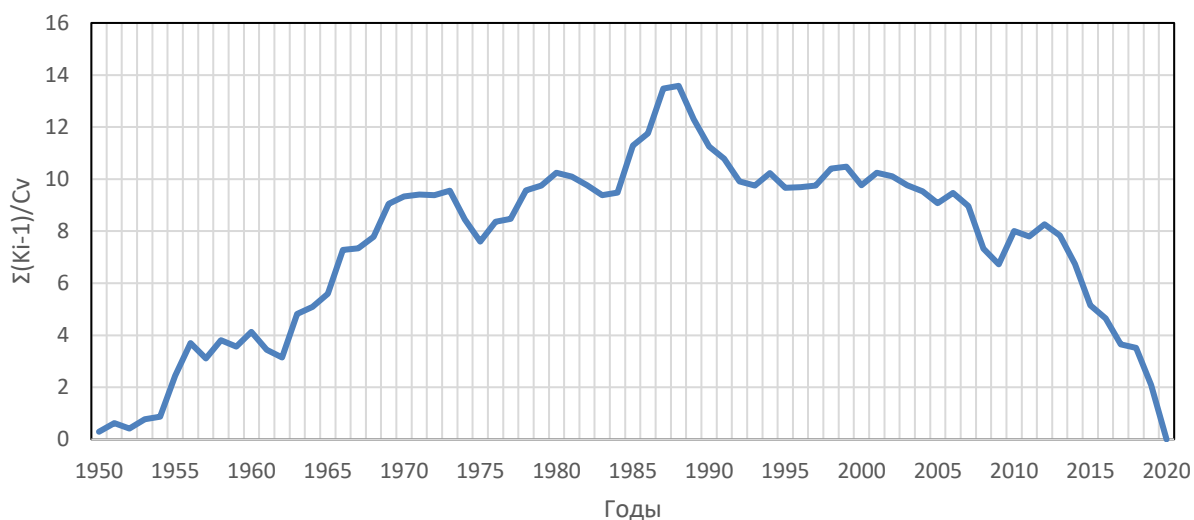


Рисунок 31 – Разностно-интегральная кривая средней температура воздуха за теплый период на метеостанции Медвежьегорск

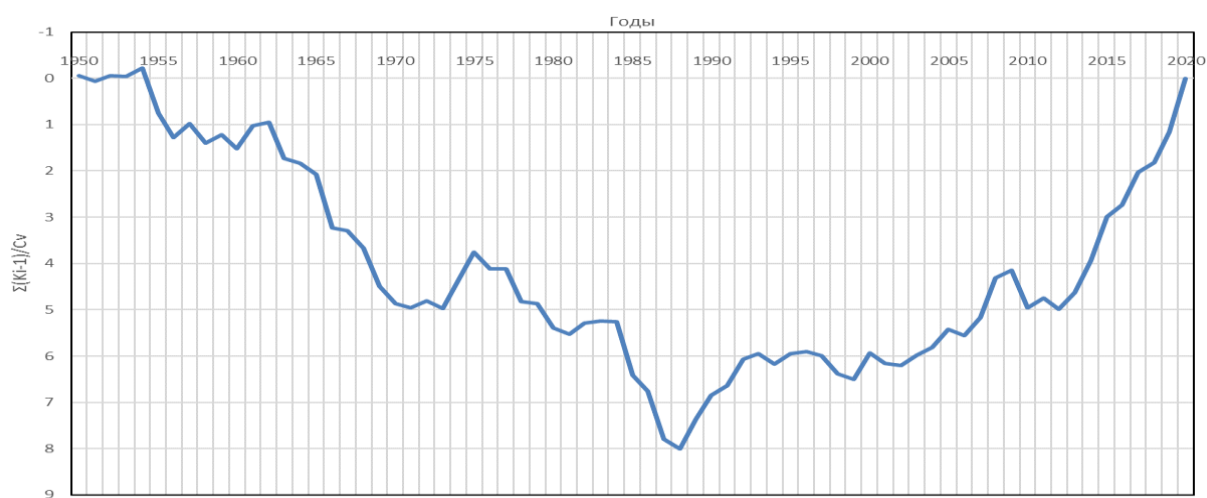


Рисунок 32 – Разностно-интегральная кривая средней температура воздуха за холодный период на метеостанции Медвежьегорск.

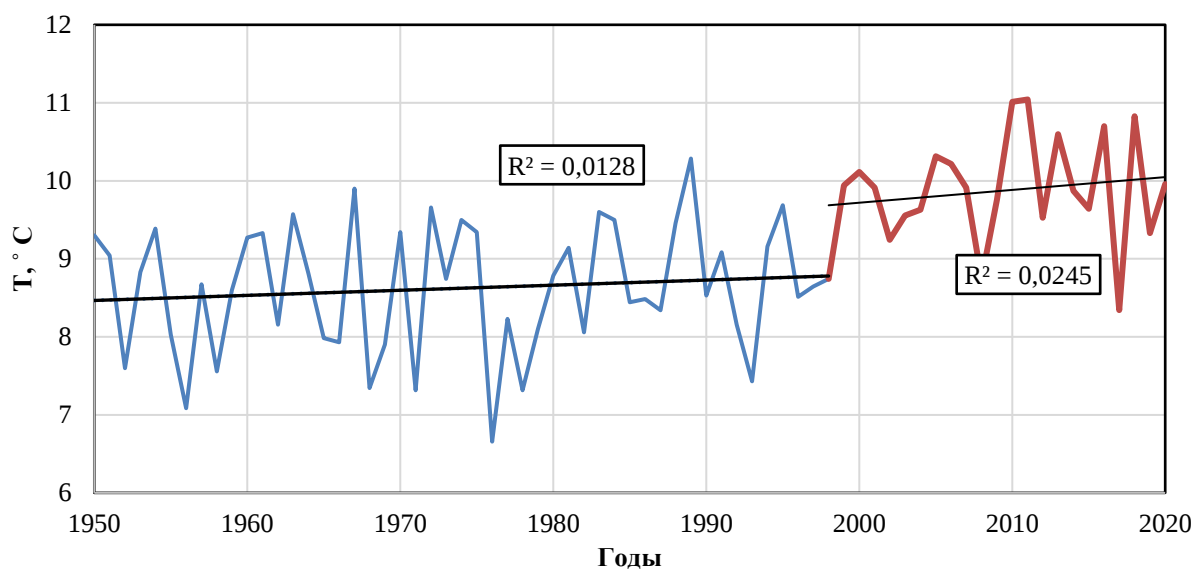


Рисунок 33 – Средняя температура воздуха за тёплый период года на метеостанции Медвежьегорск.

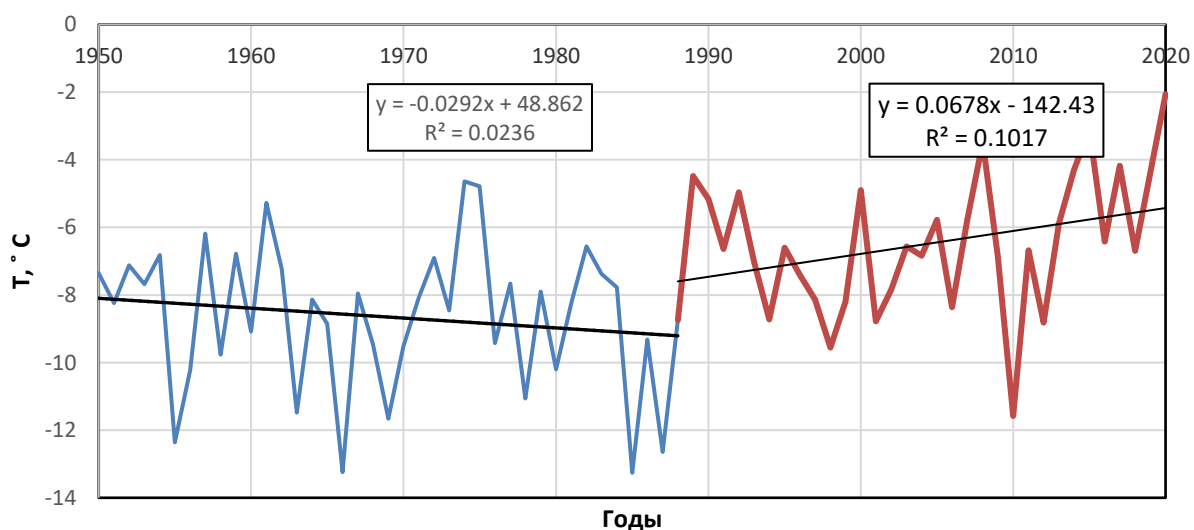


Рисунок 34 – Средняя температура воздуха за холодный период года на метеостанции Медвежьегорск.

Из графиков 34 и 35 можно сделать вывод что тенденции температуры за холодный и тёплый период года аналогичны тенденциям на метеостанции Петрозаводск.

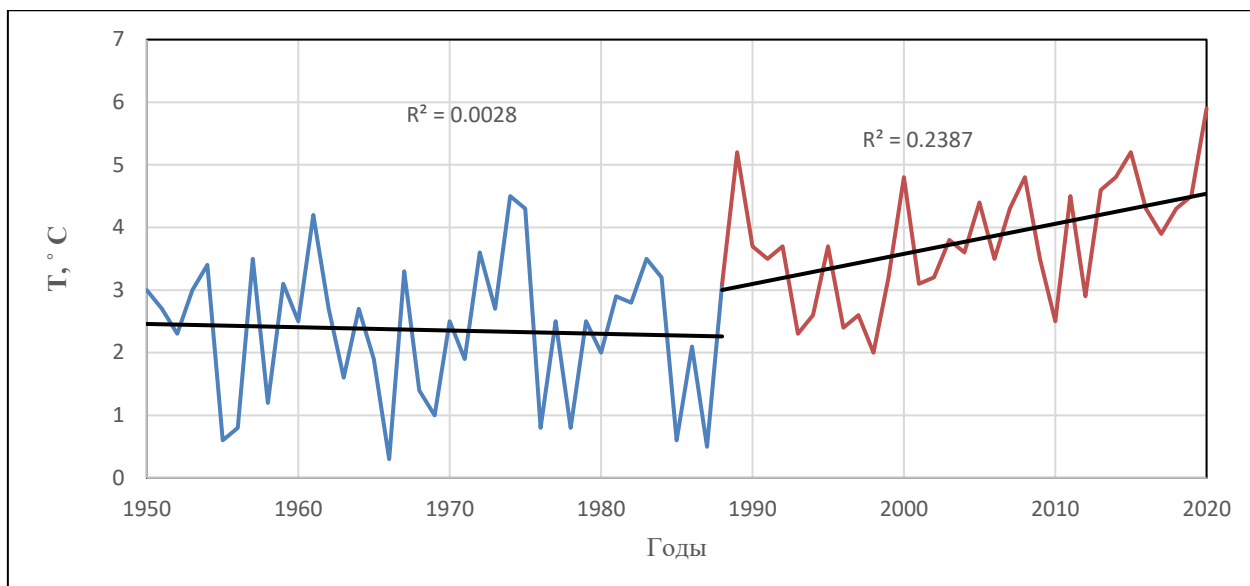


Рисунок 35 – Среднегодовая температура воздуха по метеостанции «Кондопога».

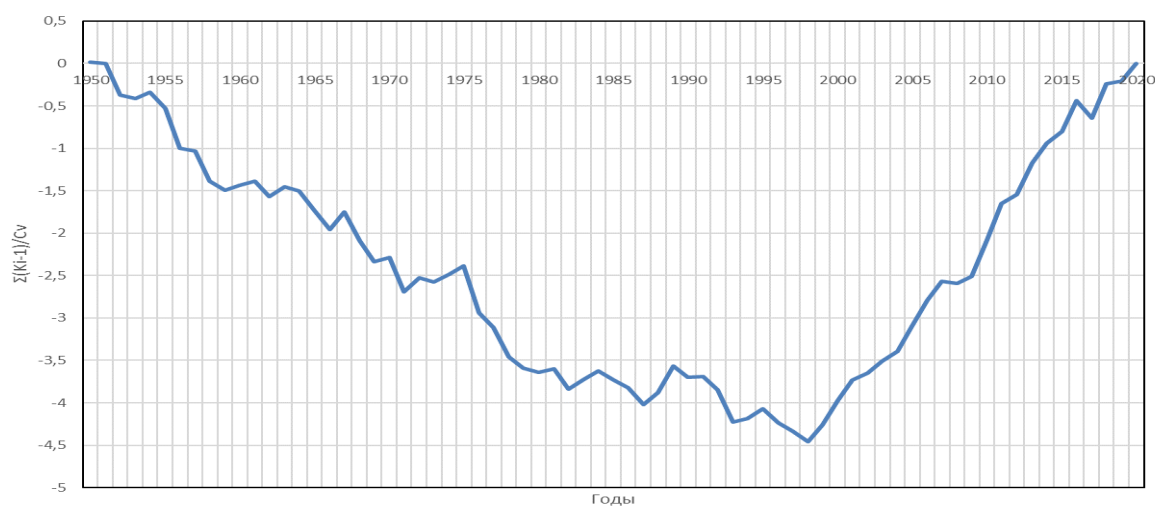


Рисунок 36 – Разностно-интегральная кривая средней температура воздуха за теплый период на метеостанции Кондопога

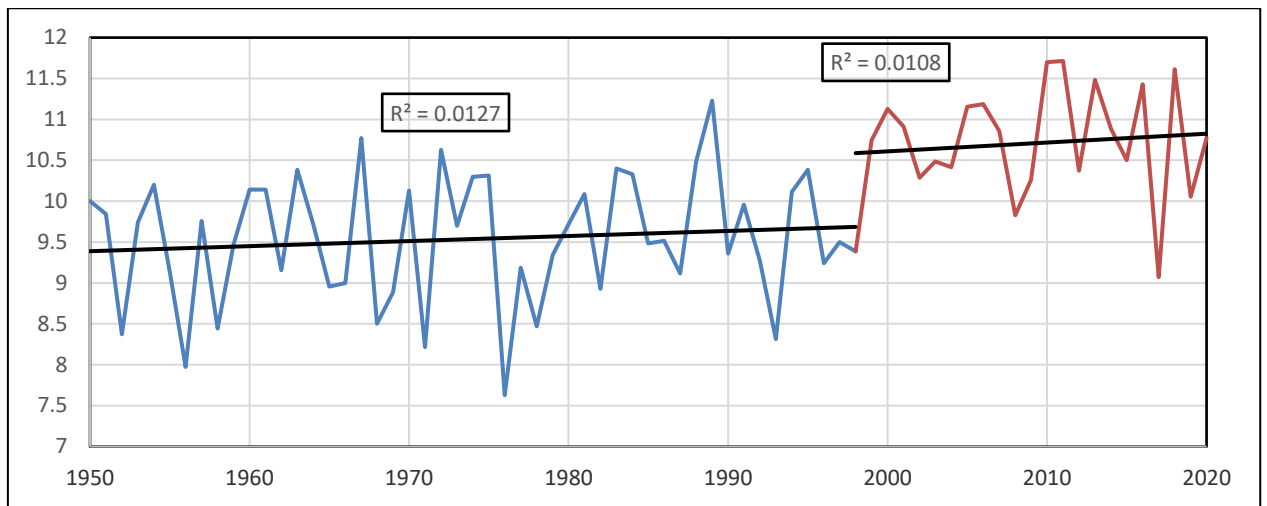


Рисунок 37– Средняя температура воздуха за теплый период года на метеостанции Кондопога.

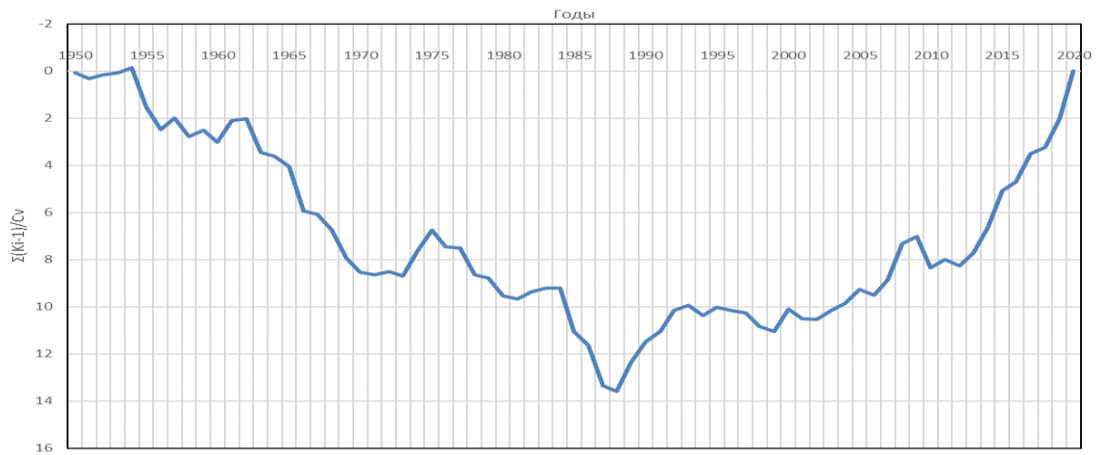


Рисунок 38 – Разностно-интегральная кривая средней температура воздуха за холодный период на метеостанции Кондопога.

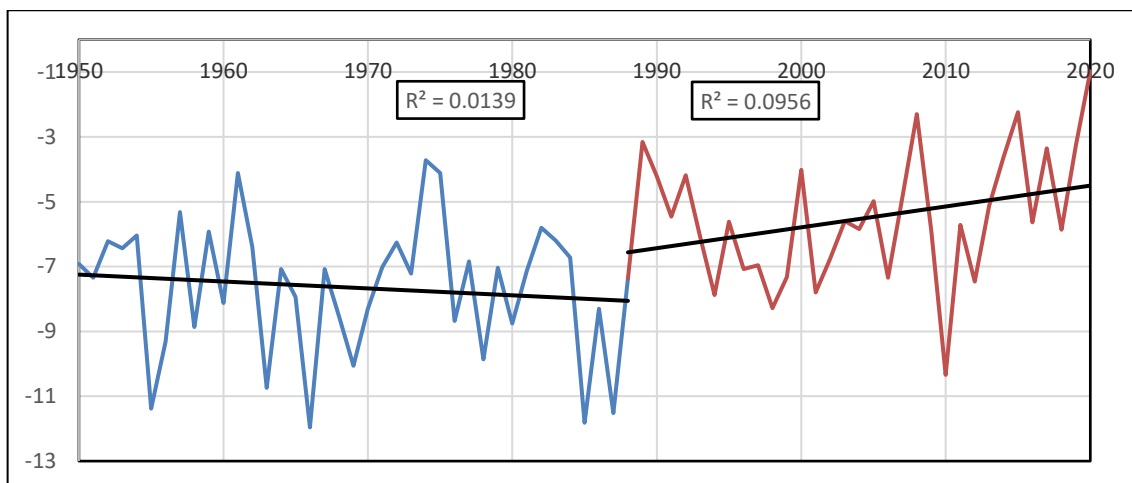


Рисунок 39 – Средняя температура воздуха за холодный период года на метеостанции Кондопога.

Исходя из графиков ситуация на метеостанции Кондопога аналогичная ситуации на метеостанции Петрозаводск.

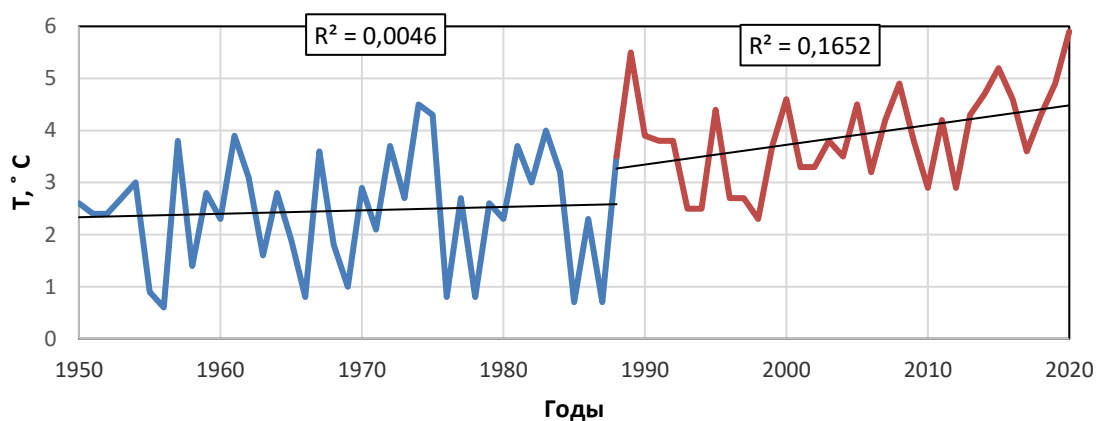


Рисунок 40 – Среднегодовая температура воздуха по метеостанции «Вытегра».

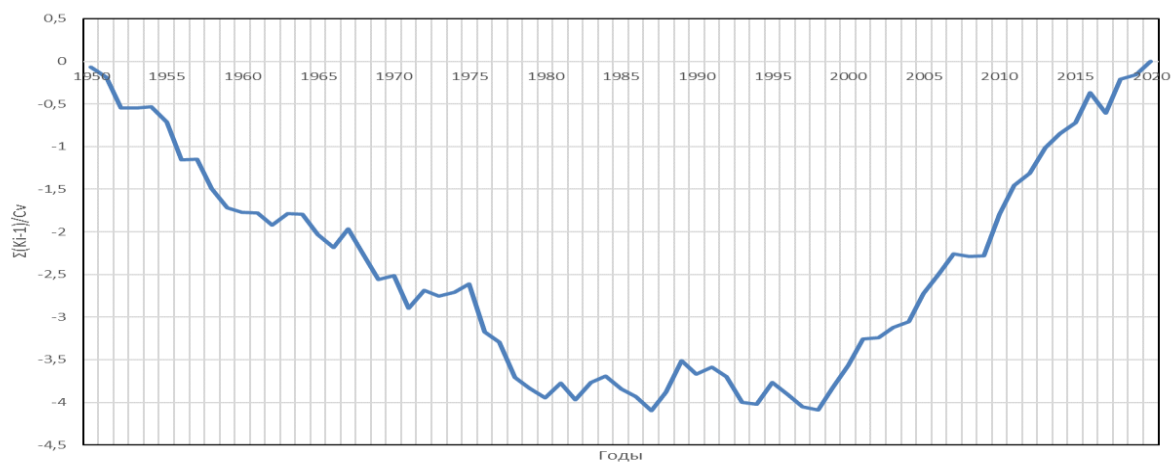


Рисунок 41 – Разностно-интегральная кривая средней температура воздуха за теплый период на метеостанции Вытегра.

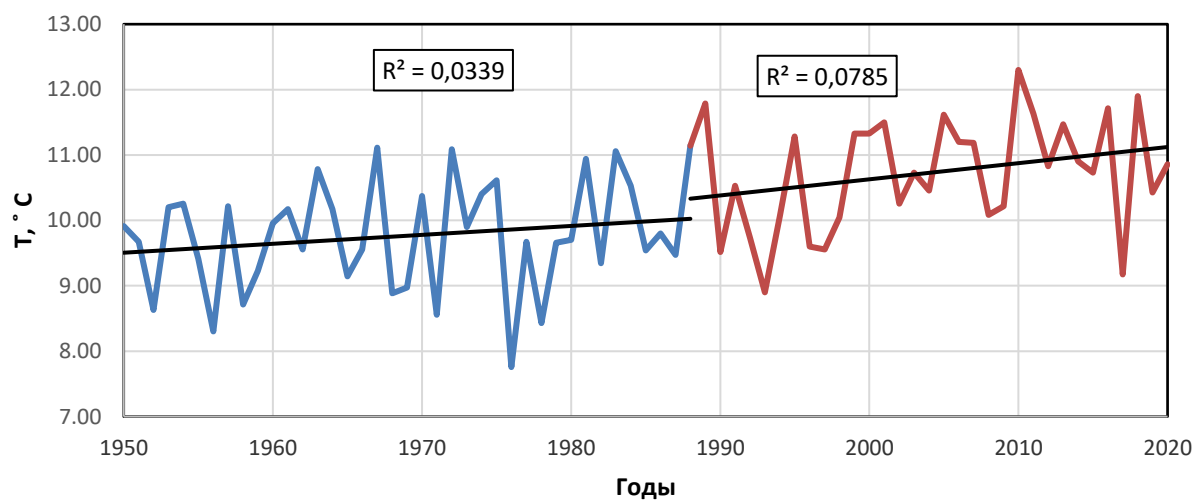


Рисунок 42 – Средняя температура воздуха за теплый период года на метеостанции Вытегра.

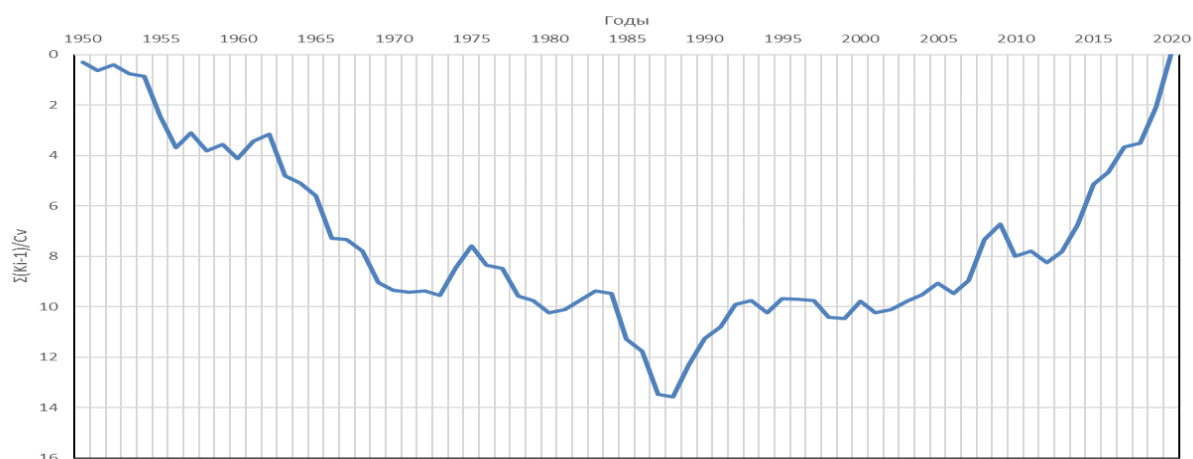


Рисунок 43 – Разностно-интегральная кривая средней температура воздуха за холодный период на метеостанции Вытегра.

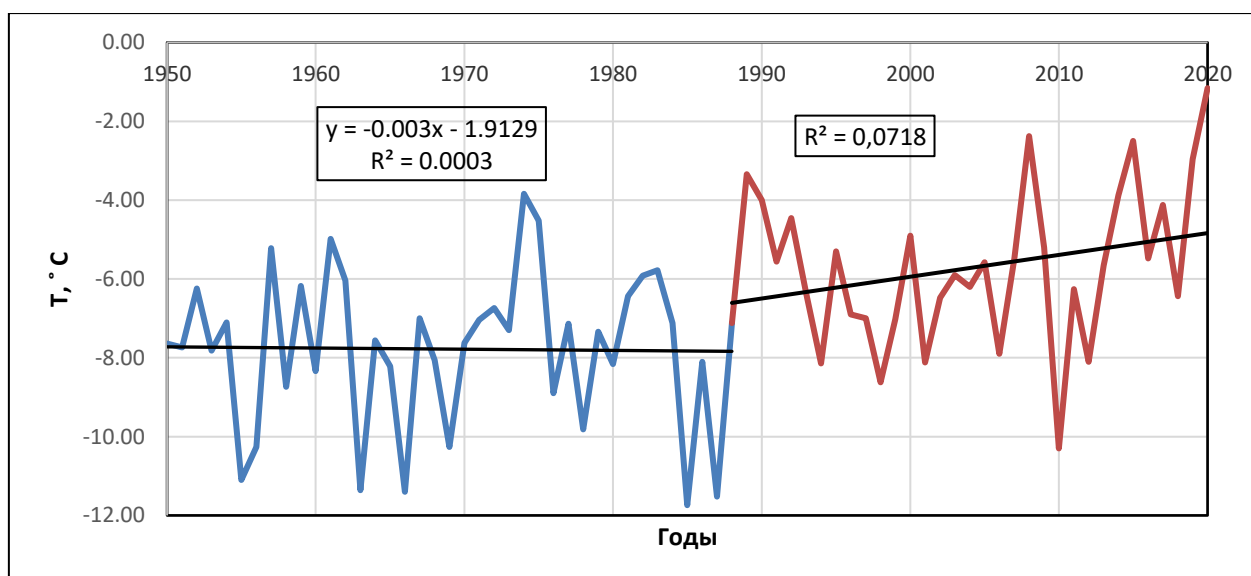


Рисунок 44 – Средняя температура воздуха за холодный период года на метеостанции Вытегра.

Изучение изменения температурного режима воздуха на метеостанциях на побережье Онежского озера выявило, что начиная с 1988 г. наблюдается тренд на повышение среднегодовой температуры воздуха, уменьшение среднегодовой толщины льда.

7.4 Сопоставление наземных данных и данных с искусственных спутников

К имеющимся ретроспективным данным были соотнесены данные высчитанные с помощью алгоритма дешифровки. Таким образом были получены графики зависимостей толщина льда–%площади льда.

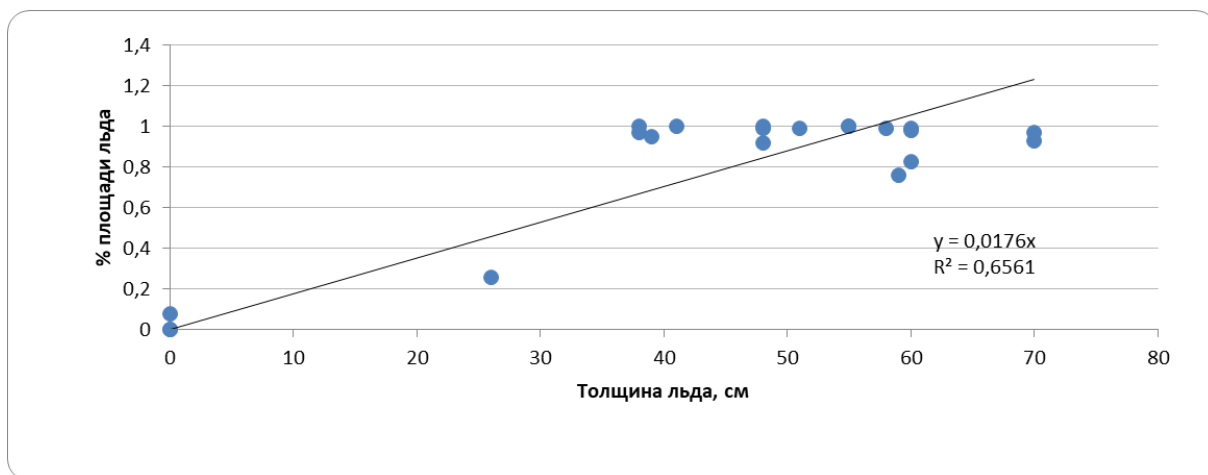


Рисунок 45 – График связи площади ледовой поверхности и толщины льда на посту Медвежьегорск.

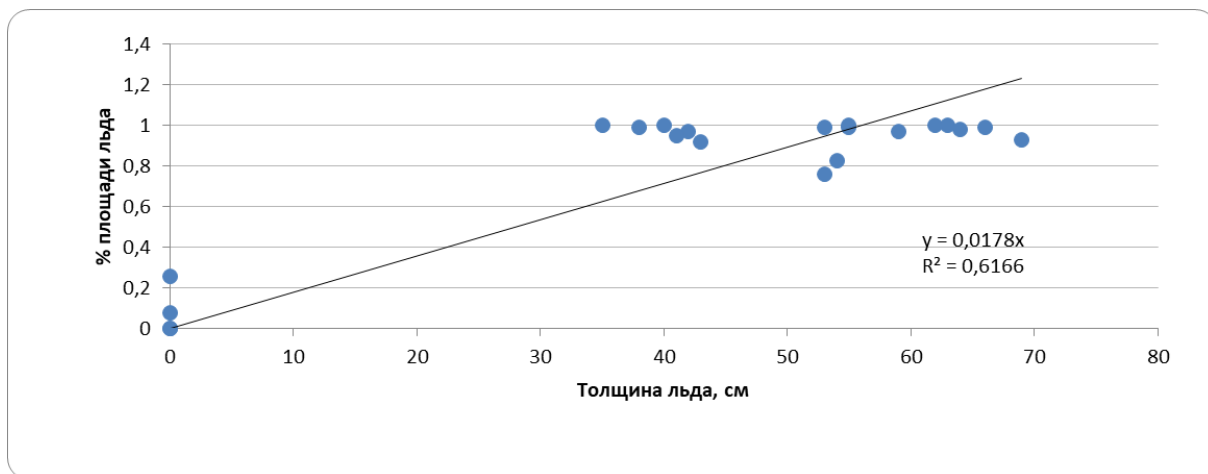


Рисунок 46 – График связи площади ледовой поверхности и толщины льда на посту Петрозаводск.

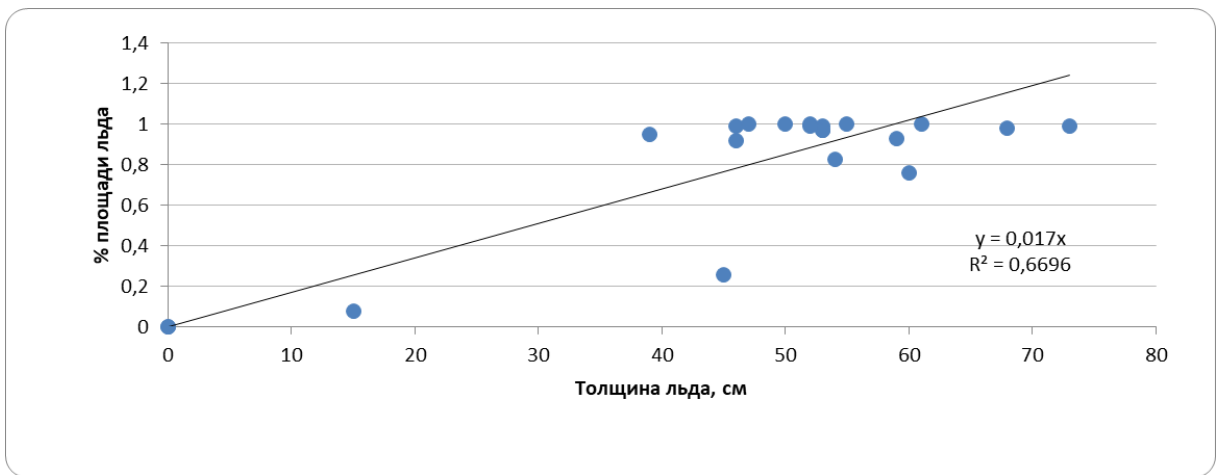


Рисунок 47 – График связи площади ледовой поверхности и от толщины льда на посту Кондопога.

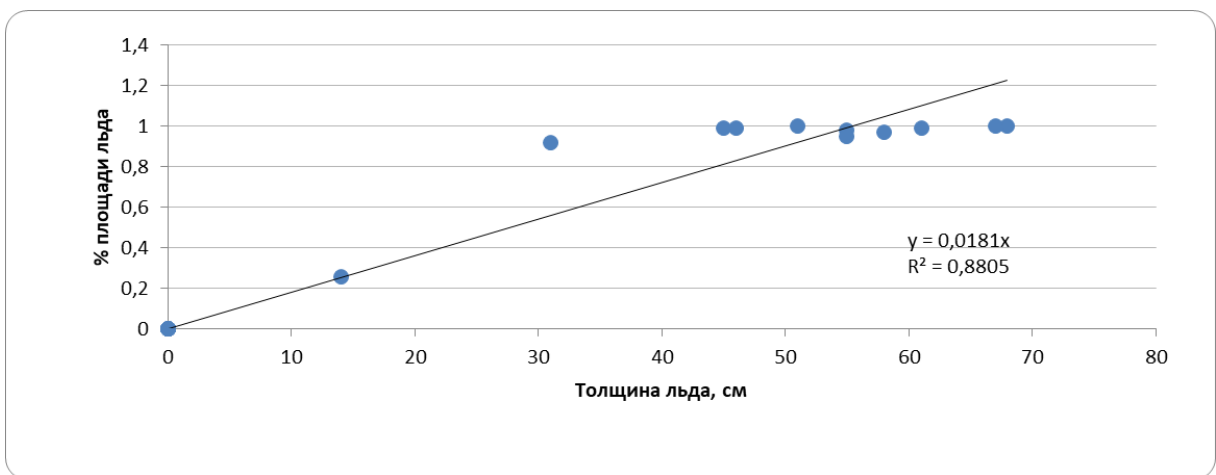


Рисунок 48 – График связи площади ледовой поверхности и толщины льда на посту д. Павликовская.

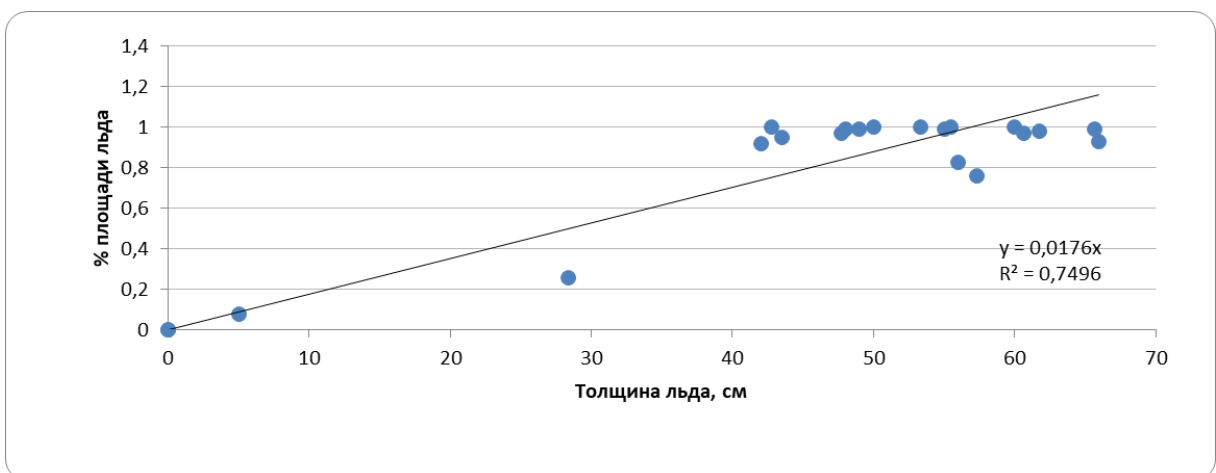


Рисунок 49 – График связи площади ледовой поверхности и средней толщины льда

На всех графиках (кроме Петрозаводска) наблюдается наибольшее отклонение в точке 09.02.1992. Снимок на данную дату представлен ниже. На космическом снимке отчетливо видно Кондопогжская губа, Повенецкий залив (вверх рисунка) находится в зоне покрытой льдом, следовательно, данные об измерениях на посту могут соответствовать фактической обстановке. Аналогичная обстановка наблюдается в районе д. Павликовская. Однако, в южной части озера наблюдается на момент дату снимка более ранняя деформация льда что характерно для данной части акватории.

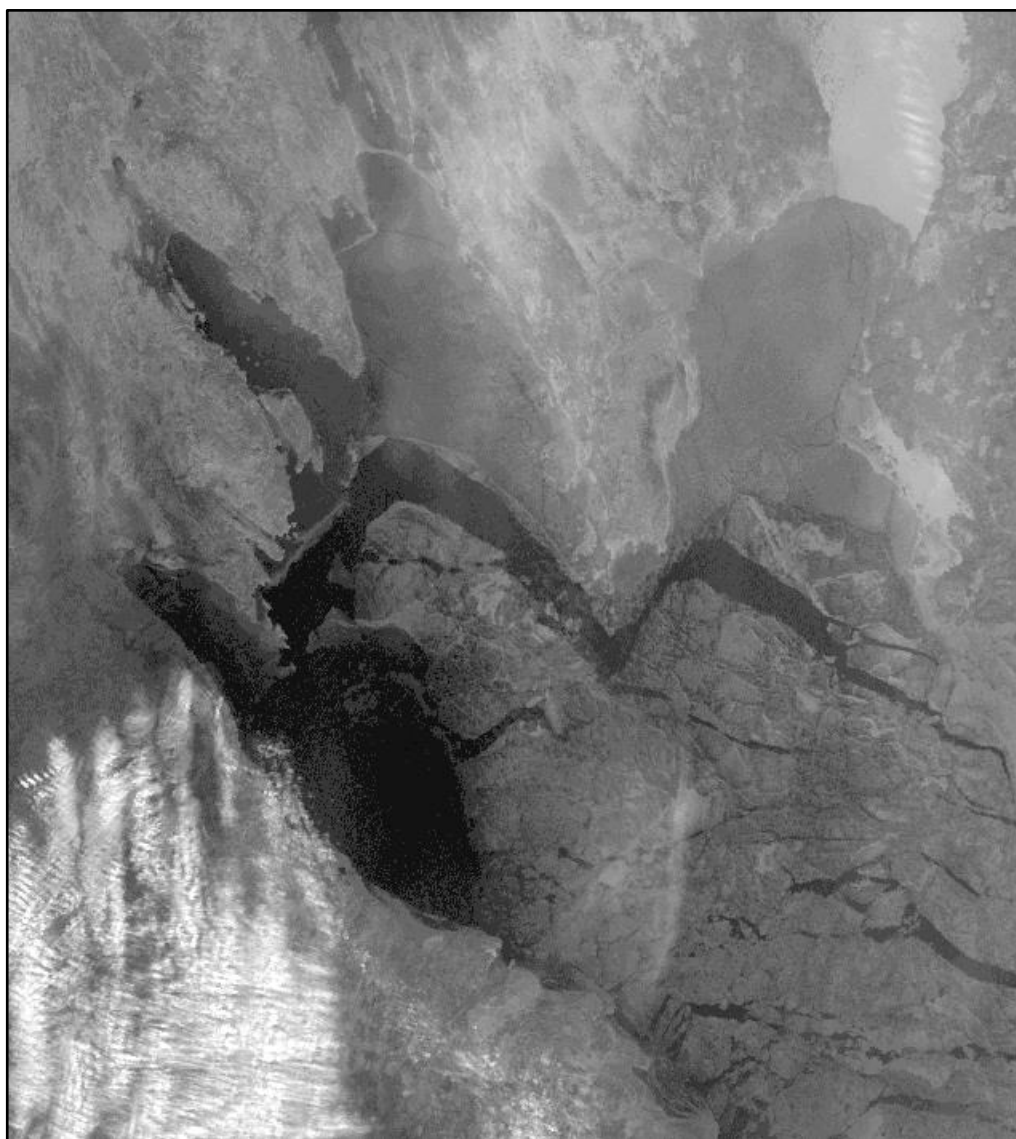


Рисунок 50 – Космический снимок центральной части Онежского озера.

На рисунке 51 представлен хронологический график согласованности толщины льда на озерных постах от площади ледового покрова. График был построен по сопоставлению данных с озерных постов и спутниковых снимков. К имеющимся спутниковым снимкам были найдены данные на максимально ближайшую дату по наблюдениям на постах. Например, снимок от 24.02.1992г был сопоставлен с 25.02.1992г. как наиболее ближайшие.

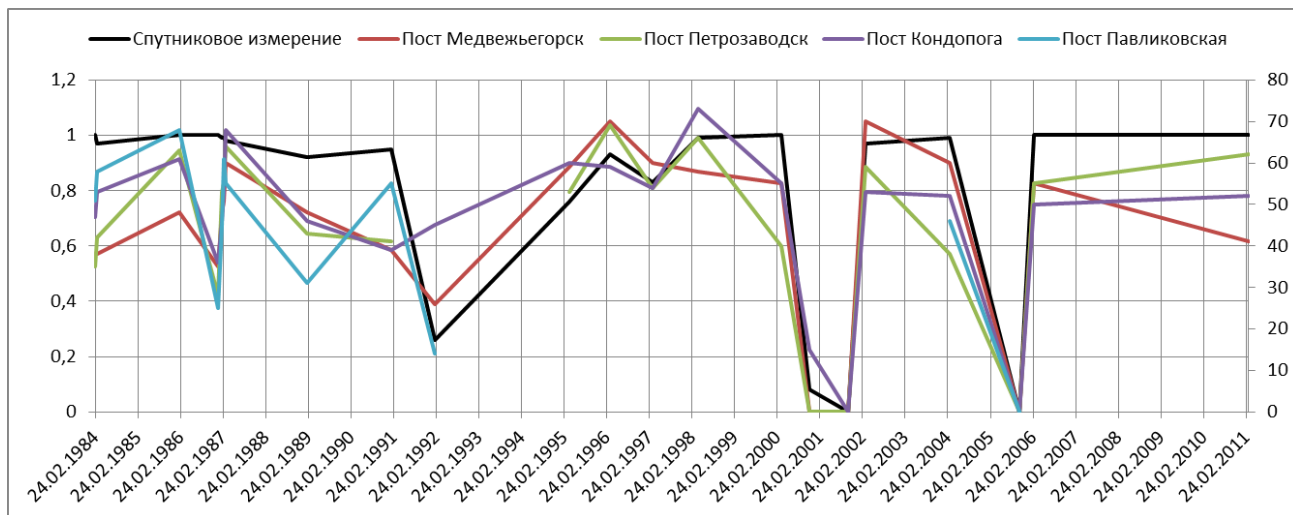


Рисунок 51 –График согласованности спутникового измерения от измерений на постах.

Полученные взаимосвязи позволяют устанавливать параметры для дальнейшего моделирования и восстановление данных через дешифрирование космических снимков.

Онежское озеро является крупным водным объектом что составляет сложность исследования озера по озерным постам. Так как, озерный пост характеризует лишь малую точку акватории. Для попытки смягчения данной сложности были картографированы коэффициент детерминации зависимости между площадью ледовой поверхности и толщины льда на озерных постах. Данные для карты были взяты из графиков 39–42. Картографирование составлялось с помощью программы *Surfer*. Картография изображена на рисунке 52.

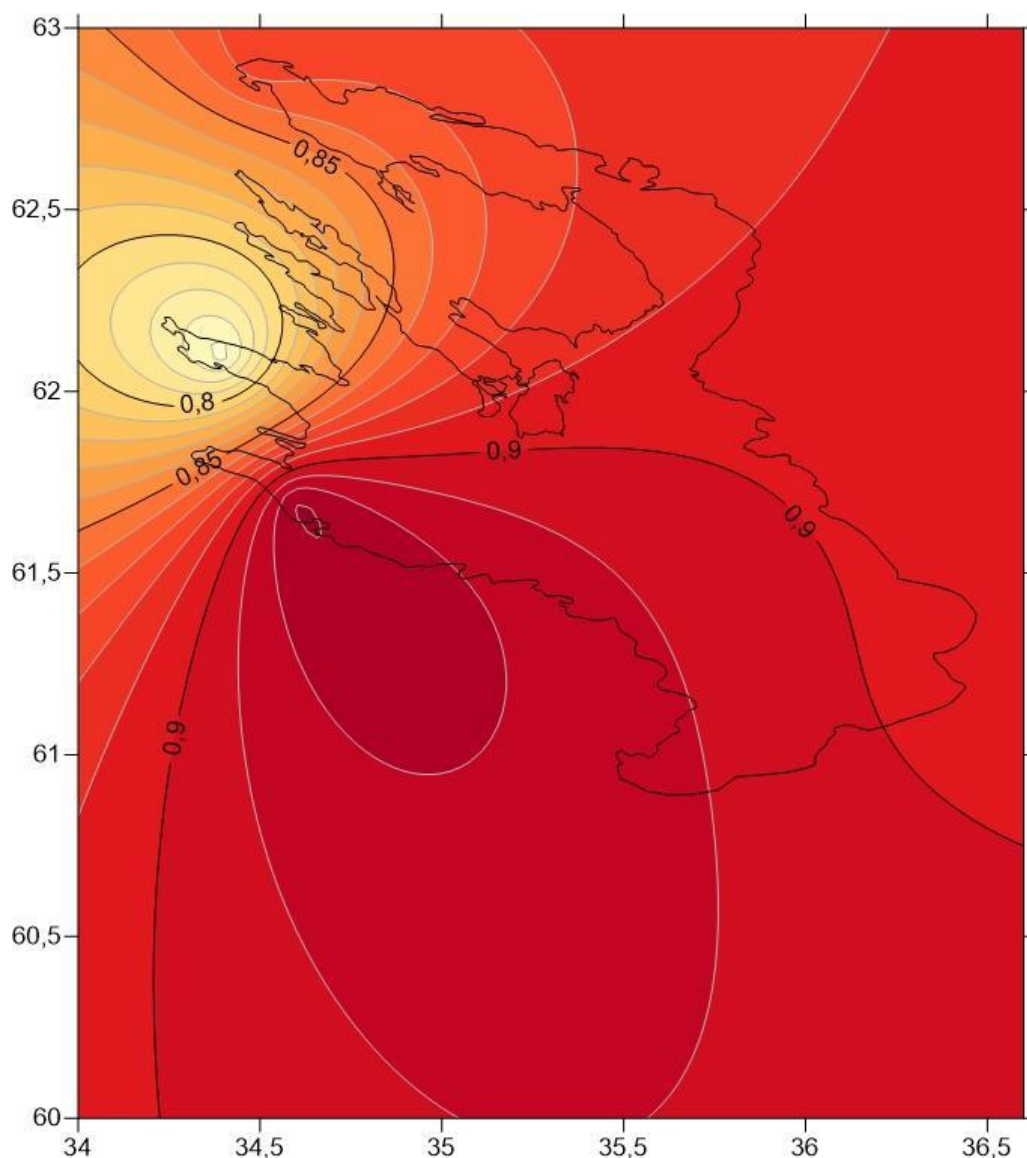


Рисунок 52 – Картография показателя зависимости между показателями площади льда и толщины льда.

Вторым шагом является привязка спутниковых данных к температуре воздуха. Для этого была взята сумма отрицательных температур, отчитываемая от 1-го января каждого года. Прогнозирование ледовых явлений по сумме отрицательных температур относится к эмпирическому методу прогнозирования.

Конечным результатом работы должно стать уравнение зависимости площади ледовой поверхности и суммы отрицательных температур. Соответственно, библиотека спутниковых снимков была пополнена более детально. Отдельно были изучены месяцы: март, апрель, октябрь, ноябрь.

Итогом стало выявление 11 снимков за март, 4 снимка за апрель, и одного снимка за ноябрь. Такая резкая разница в количестве снимков обуславливается высокой облачностью осенью. Результаты представлены в приложении Б. Сравнив суммы отрицательных температур и процент площади покрытой льдом получился график, изображенный на рисунке 52. Коэффициент детерминации получился 0,80. Что говорит о достоверной связи.

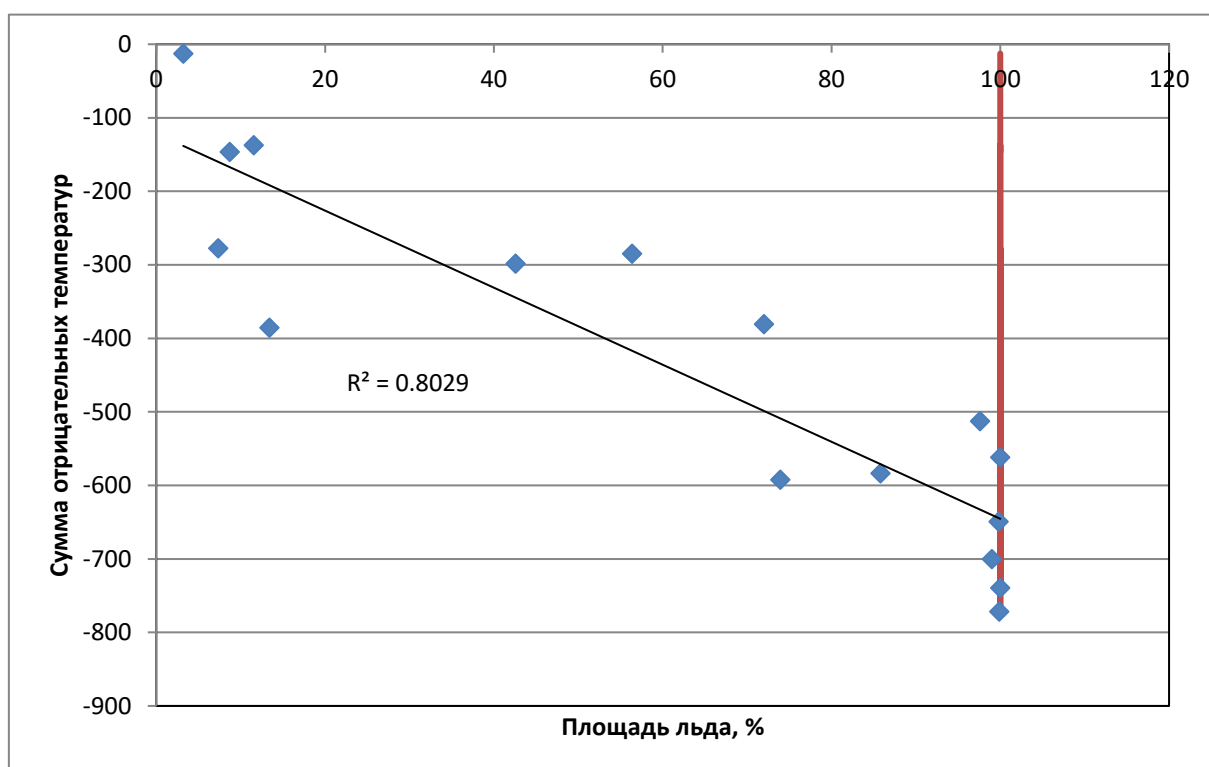


Рисунок 53 – График зависимости суммы отрицательных температур и процента площади покрытой льдом.

На графике (рисунки 53, 54) видны две точки которые сильно отклоняются от аппроксимирующей линии. Данные точки относятся к 2014 и 2015 г. Отдельный анализ этих лет показывает, что температура в месяцы этих годов была выше среднемноголетней среднемесячной температуры. На рисунке 55 изображен график сравнения хода среднемесячных температур в 2014, 2015 в сравнении с многолетним.

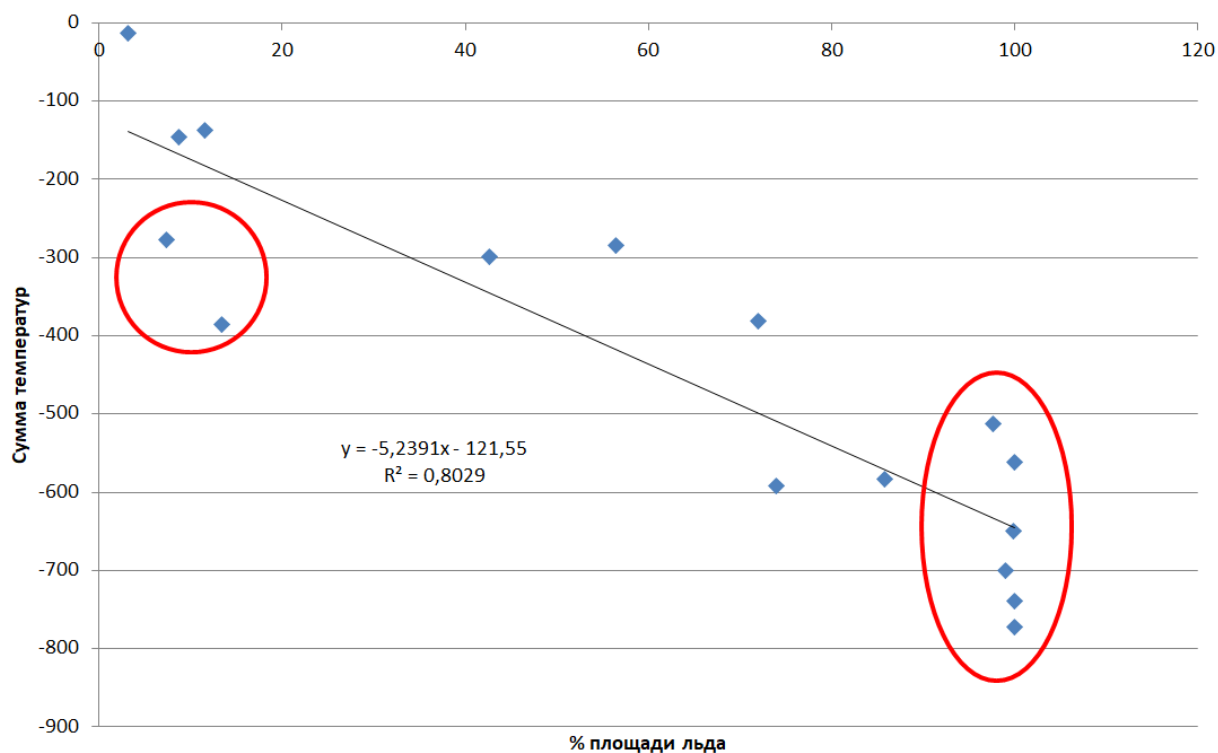


Рисунок 54 – Зоны наибольшего отклонения.

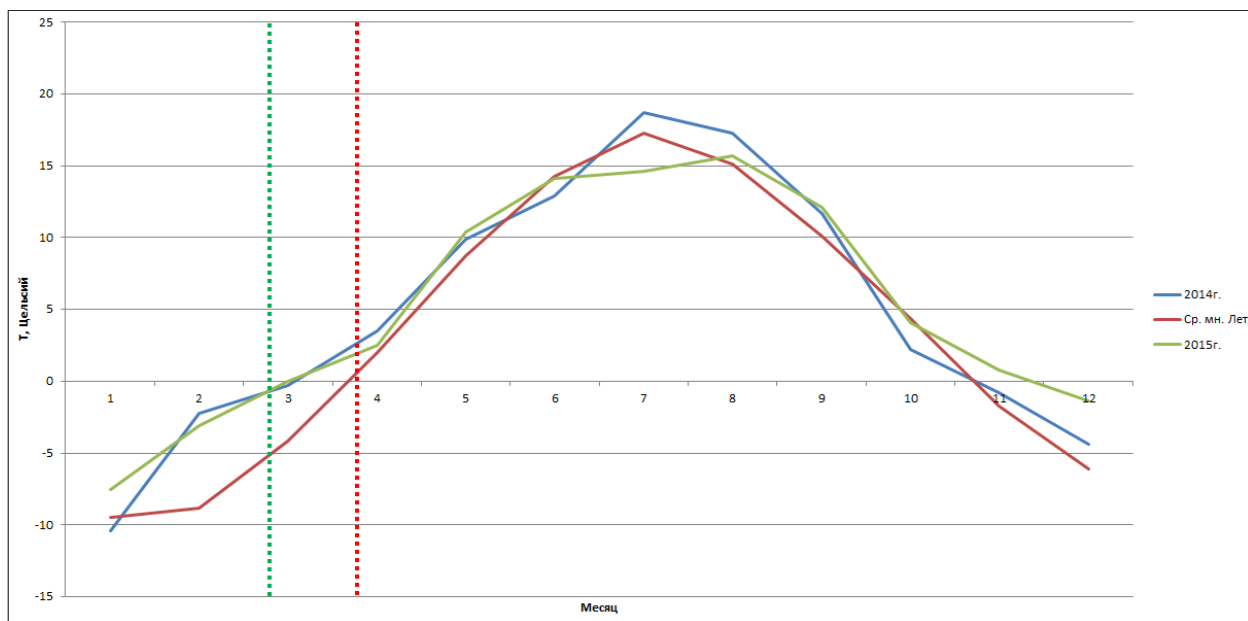


Рисунок 55 – График линии хода среднемесячной температуры воздуха.

Крайняя нижняя точка указывает на наибольшую сумму отрицательной температуры и соответствует 100 % покрытия поверхности озера. Однако, спутниковый мониторинг не может отследить толщину льда

и поэтому наблюдается достаточно большая разница толщины льда от процента площади льда. Разница порядка 300°С (в сумме отрицательных температур). Подобное различие может обуславливаться:

1. Поздним ледообразованием
2. Большим отличием температур зимой
3. Невозможностью дешифровки толщины льда

Помимо этого, была составлена матрица корреляций (таблица 5). В матрице учитываются взаимосвязи между: а – процентом площади льда к площади озера, б – сумме отрицательных температур, в – толщине льда.

Таблица 5 – Матрица корреляций

	а	б	в
а	1		
б	–0,89	1	
в	0,76	–0,65	1

Согласно матрице корреляций выявлены зависимости достоверные зависимости между всеми тремя параметрами. Данные обработаны по периоду деградации или нарастания льда за период 1985–2011 гг. Расчет по уравнению детерминации показывает отклонение от фактических результатов в среднем примерно на 12% от площади озера. В таком случае прогнозная модель может давать достаточно большую ошибку.

7.5 Апробация методики прогноза

Для апробации результатов были отобраны некоторые снимки и высчитаны по уравнению регрессии (5) показатель площади льда. Уравнение было получено при построении обратного графика зависимости (рисунок 53)

$$y = -5,23x - 121,55 \quad (5)$$

где y – площадь льда в процентах;

x – сумма отрицательных температур от 1 января года наблюдения.

Таблица 6 – Результат прогноза площади льда

Дата	Сумма отрицательных температур на момент снимка, °C	Фактическое значение процента площади льда, %	Прогнозное значение процента толщины льда, %	Погрешность, %
16.04.2022	324,8	66,27	49,7	16,6
28.04.2006	739,8	100,0	100,0	0
24.04.2019	276,6	23,61	35,67	12,1

Ниже представлены непосредственно сами снимки на даты. Стоит отметить что столь большая погрешность может быть объяснена другими факторами формирования и разрушения льда а также отсутствием данных о среднесуточной температуре воздуха на других метеостанциях.

Апробация показала, что метод определения площади покрытия льдом Онежского озера может быть спрогнозирован через сумму отрицательных температур. Однако для дальнейшего совершенствования прогнозирования необходимо учитывать и другие критерии а также расширять базы данных о температуре воздуха.

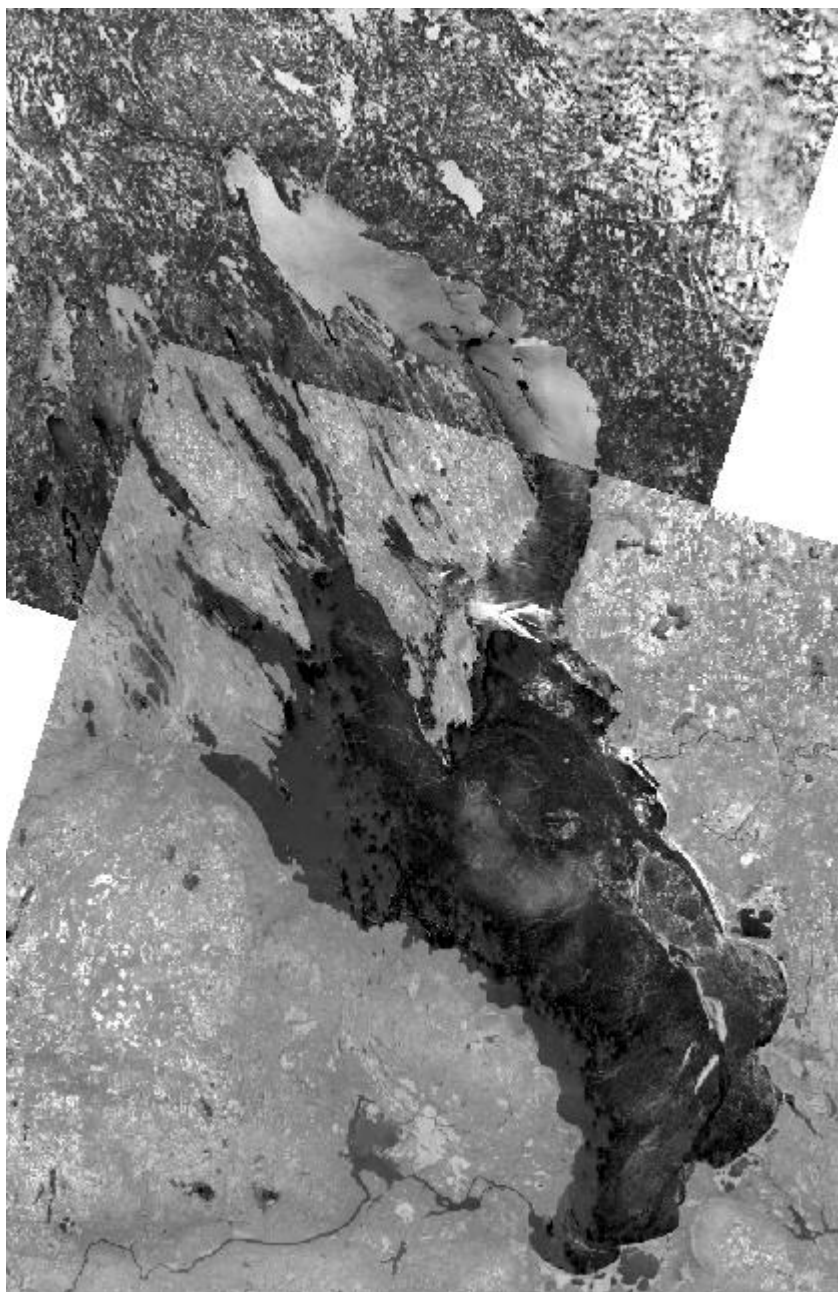


Рисунок 56 – Космический снимок от 20.04.2019(верхний) и 24.04.2019 г.
(нижний).

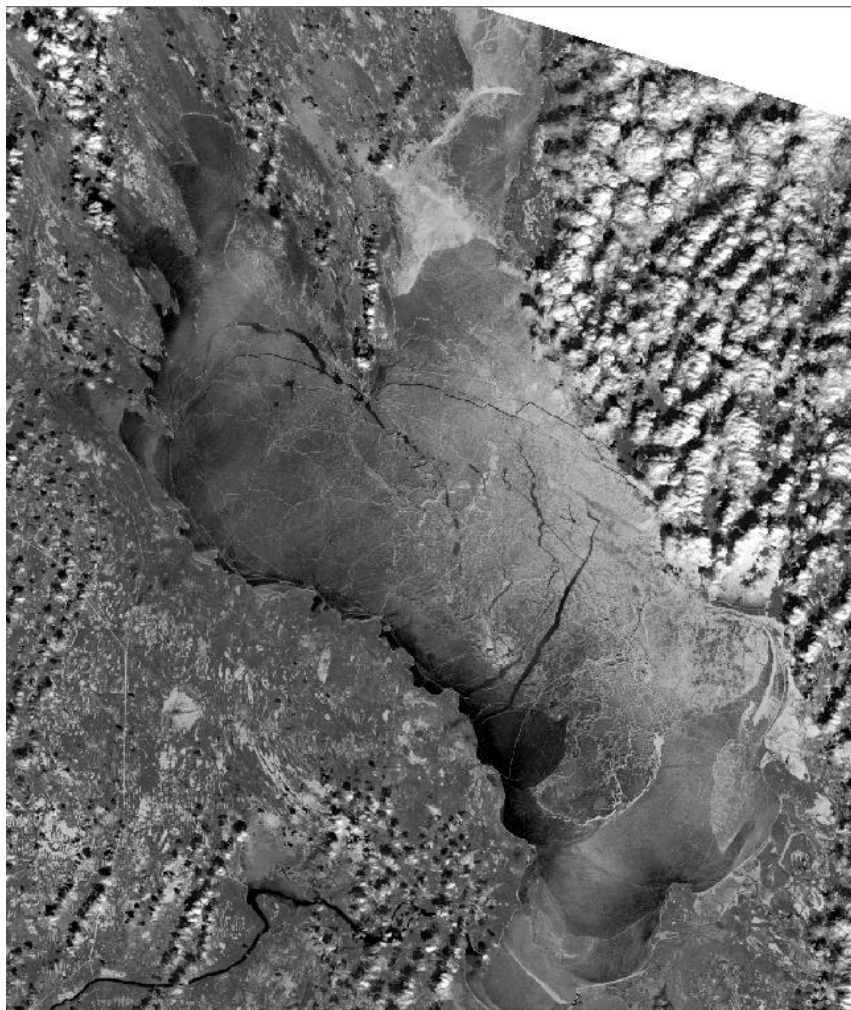


Рисунок 57 – Космический снимок от 16.04.2022 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По завершению данной магистерской диссертации были

А) Изучены возможности спутникового мониторинга в пределах Онежского озера. Спутники *Landsat* позволяют производить спутниковый мониторинг состояния ледового покрова Онежского озера. Однако, повышенная облачность значительно сужает количественную характеристику.

Б) Собрана библиотека спутниковых снимков. Было собрано и обработано 59 космических снимков за период с 1984 г. по 2020 г. Обработка производилась в канале В5.

В) Изучены и применены алгоритмы дешифрирования спутниковых снимков на класс “Вода–Лёд”. Программное обеспечение *ArcMap* имеет достаточно качественные инструменты для дешифровки космических снимков.

Г) Удалось получить взаимосвязь между полученными данными с ретроспективными наземными данными (температура, толщина льда). Была найдена взаимосвязь между всеми тремя параметрами. Связь считается достоверной (0,6–0,8)

Д) Апробировать результаты.

Апробация результатов показала, что имея достоверные связи между параметрами, возможно, определять площадь льда Онежского озера по сумме отрицательных температур. Однако, были выявлены сильные недостатки. В частности, недостаток данных с других метеостанций, что послужило достаточно большой погрешности (около 12 %). Предполагается внедрение других факторов и более детальное изучение данной темы для повышения точности и возможности прогнозирования состояния ледового покрова Онежского озера.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Молчанов И.В. Онежское озеро. – 1 изд. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1946. – 207 с.
2. Беляев П.Ю. Рельеф дна и строение поздневалдайских–голоценовых отложений котловин Ладожского и Онежского озёр: дис. кандидата Геоморфология и палеогеография наук: 1.6.14. – Санкт–Петербург, 2021. – 113 с.
3. Степанов П.М., Головань Е.В. Исследование многолетнего ледово–термического режима Онежского озера // Гидрология и океанология – 2023. – Санкт–Петербург: БУК, 2023. – С. 136–139.
4. Яценцев С. А. Изменения условий среды Онежского озера в позднем плейстоцене–голоцене по данным диатомового анализа :Выпускная квалификационная работа / Яценцев, С. А. ; Санкт–Петербургский государственный университет. – Санкт–Петербург, 2021. – 37 с.
5. Гидрология озер и водохранилищ [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки "Гидрометеорология" / К. К. Эдельштейн ; Московский гос. ун–т им. М. В. Ломоносова, Географический фак., Каф. гидрологии суши. – Москва : Перо, 2014. – 398 с.
6. Останина О. В. Оценка регулирующей способности Онежского озера и его водосбора: Выпускная квалификационная работа / Останина О. В. ; Российский государственный гидрометеорологический университет. – Санкт–Петербург, 2018. – 140с.
7. *Действующие гидрологические посты сети Росгидромета* / [Электронный ресурс] // ЕСИМО : [Электронный ресурс]. – URL: http://esimo.ru/dataview/viewresource?resourceId=RU_RIHMI-WDC_2665 (дата обращения: 22.07.2024).

8. *SIOWS: Arctic by SOLab* / [Электронный ресурс] // SIOWS: Arctic portal : [сайт]. – URL: <http://siows.solab.rshu.ru/> (дата обращения: 17.09.2024).
9. *EarthExplorer* / [Электронный ресурс] // USGS : [сайт]. – URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 18.09.2024).
10. Сумачев А. Э. Совершенствование методов прогнозирования характеристик ледового режима рек бассейнов Баренцева и Белого морей : специальность 1.6.16 «Гидрология, водные ресурсы, гидрохимия» : Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сумачев, А. Э. ; Государственный Гидрологический Институт. – Санкт–Петербург, 2022. – 173 с.
11. Руководство по гидрологическим прогнозам. Прогноз ледовых явлений на реках и водохранилищах [Текст] / – Выпуск 3. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1989 – 168 с.
12. *EarthData* / [Электронный ресурс] // LAADS DAAC : [Электронный ресурс]. – URL: <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/#level0-level1> (дата обращения: 19.02.2025).
13. Останина О.В., Мякишева Н.В. Оценка регулирующей способности Онежского озера и его водосбора [Текст]/ Останина О.В., Мякишева Н.В. – Санкт–Петербург, 2018 –140 с.
14. Сутырина Е.Н. Дистанционное зондирование земли [Текст]/ Сутырина Е.Н. – Иркутск, 2013 – 167с.
15. Korosov A.A., Pozdnyakov D.V. Machine Learning for Ice Cover Mapping from Satellite Data. Remote Sensing, [Текст]– 2020, 83–89с.
16. Сало Ю.А., Назарова Л.Е. Многолетняя изменчивость ледового режима онежского озера в условиях нестационарности регионального климата. Известия Русского географического общества. 2011;143(3):50–54.
17. *Google. Google Earth Pro* [Электронный ресурс]// URL: www.google.com/earth/ (дата обращения: 02.05.2025).

18. Баклагин В.Н. Влияние метеорологических условий на формирование ледового режима Онежского озера [Текст]/ В.Н. Баклагин – Петрозаводск, 2019 – 11с.

19. Баклагин В.Н. Схемы развития ледовых процессов на Онежском озере [Текст] // Астраханский вестник экологического образования. – 2019. – №3(51). – с. 71–77.

20. Баклагин В.Н. Критический анализ спутниковых данных о пространственном распределении льда на озерах // [Текст] Успехи современного естествознания. – 2019. – №2. – С. 41–48.

Приложение А – Показатель площади льда после дешифровки

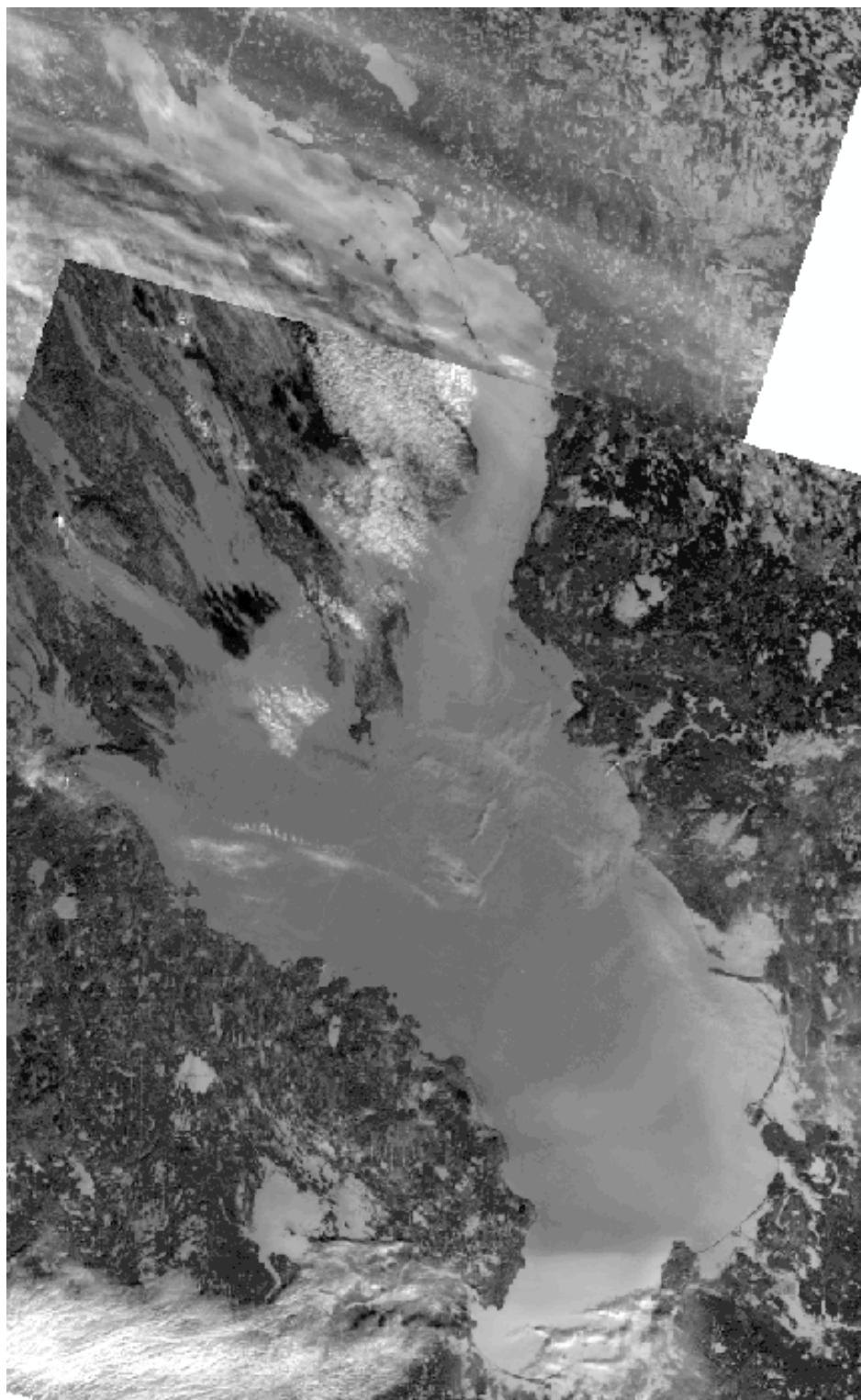
Дата	% поверхности льда
24.02.1984	100
14.03.1984	97
17.02.1986	100
10.01.1987	100
11.02.1987	99
27.02.1987	99
15.03.1987	98
09.02.1989	92
06.02.1991	95
09.02.1992	26
06.04.1995	76
23.03.1996	93
26.03.1997	83
14.04.1998	99
29.03.2000	100
21.11.2000	8
24.10.2001	0
24.03.2002	97
13.03.2004	99
27.10.2005	0
03.03.2006	100
17.03.2011	100
12.03.2015	12
27.03.2015	44
22.03.2016	94
24.10.2016	0

Дата	% поверхности льда
25.03.2017	80
15.02.2018	89
04.03.2018	100
05.03.2018	100
28.03.2018	100
15.10.2018	0
30.10.2018	0
30.10.2018	0
01.12.2018	3
14.03.2019	100
17.03.2020	20
26.03.2020	17
29.10.2020	100

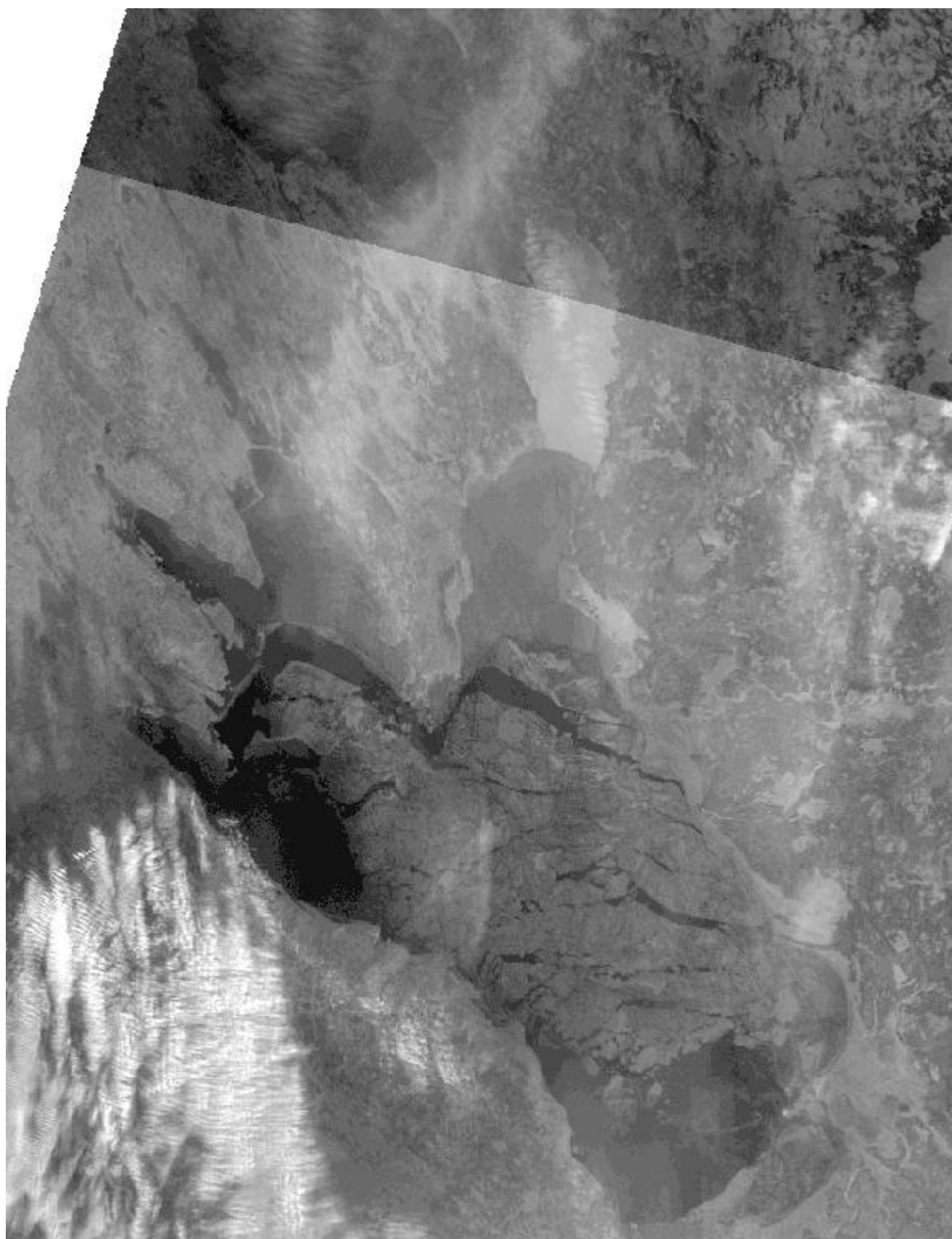
Приложение Б – Показатель площади льда после дешифровки на дополнительных снимках

Март		Апрель		Ноябрь	
12.11.1999	3,2	24.04.2019	4,2	12.11.1999	3,2
30.03.1995	56,4	19.04.2014	0		
26.03.1997	85,8	10.04.2014	13,4		
03.03.2000	72	04.04.2013	100		
29.03.2001	99	24.04.1990	42,6		
13.03.2004	99,8	29.04.1986	90,4		
16.03.2005	100	07.04.1984	73,93		
17.03.2011	99,9				
12.03.2015	7,36				
04.03.2018	97,6				
09.03.2020	11,56				
25.03.2020	8,7				

Приложение В – Космический снимок от 06.02.1991



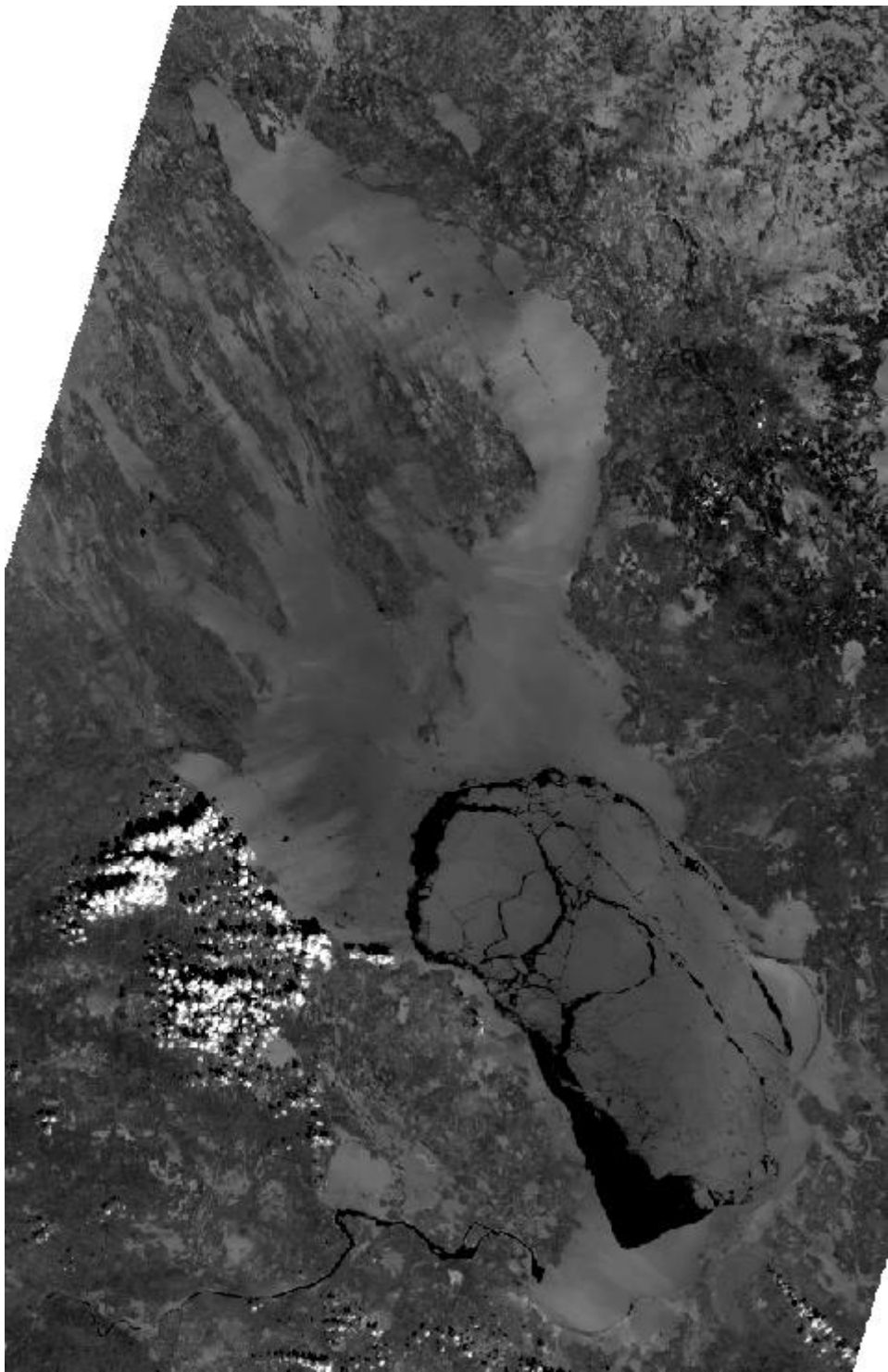
Приложение Г – Космический снимок от 09.02.1992

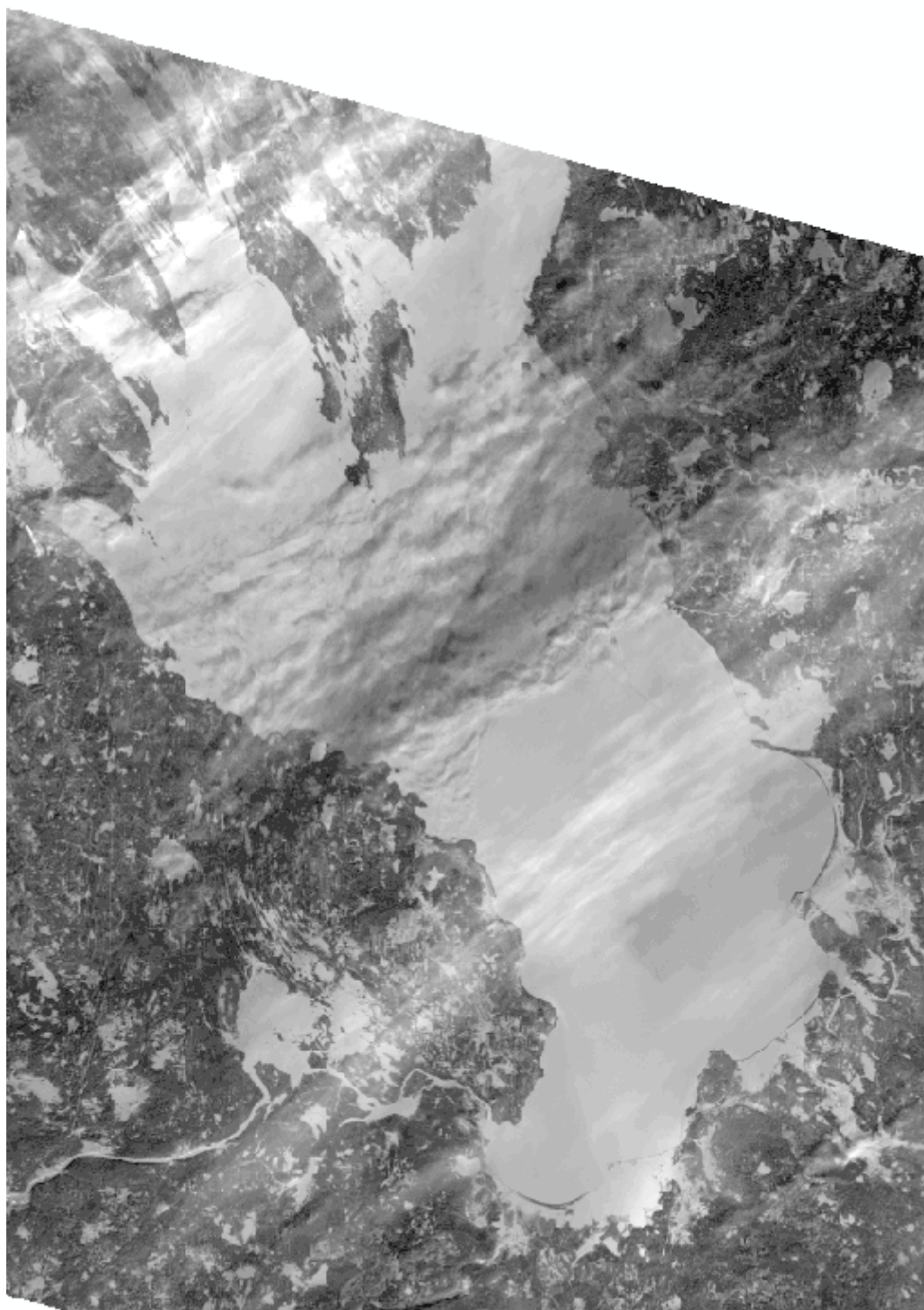


Приложение Д – Космический снимок от 27.02.1987

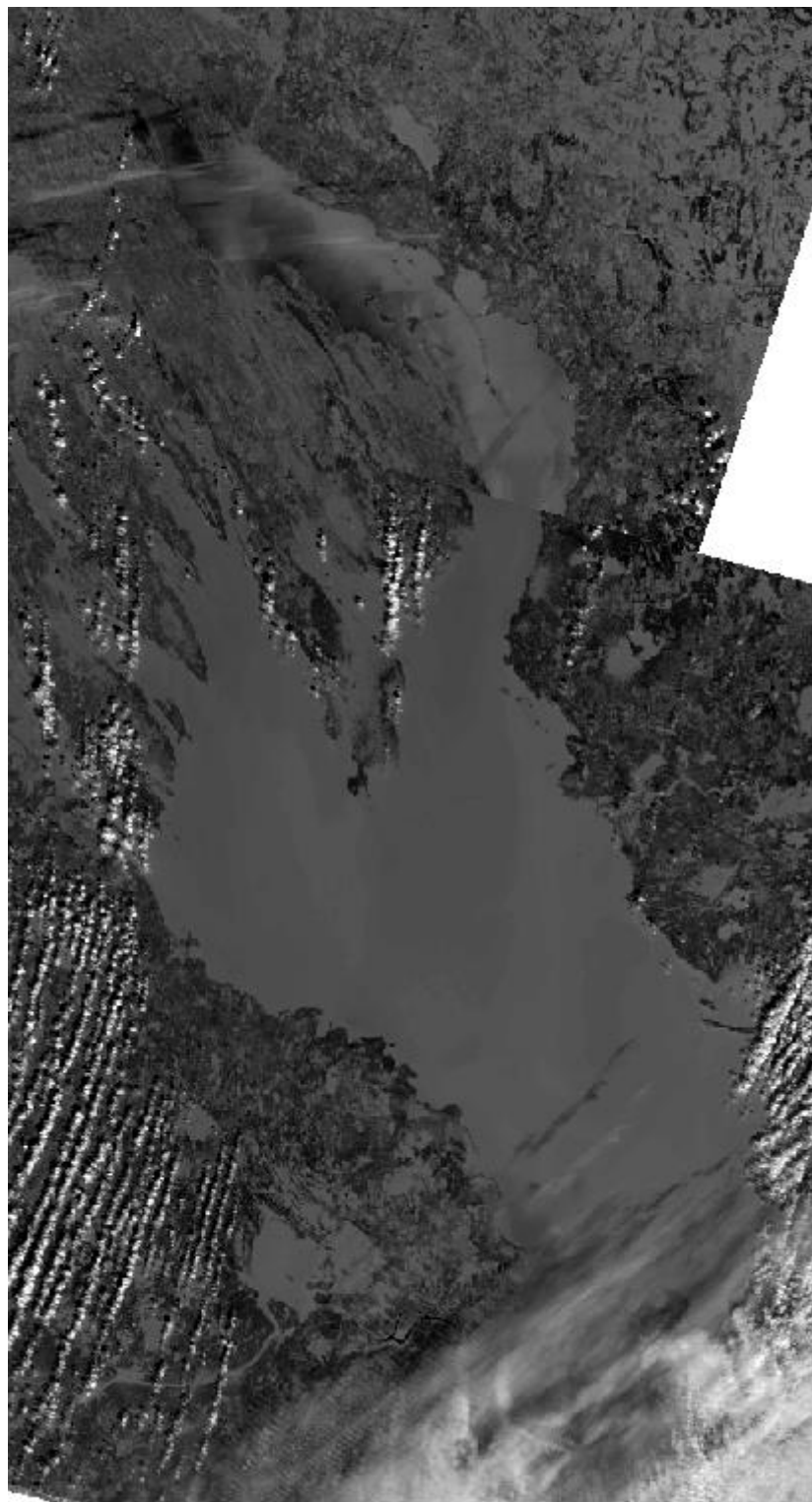


Приложение Е – Космический снимок от 06.04.1995

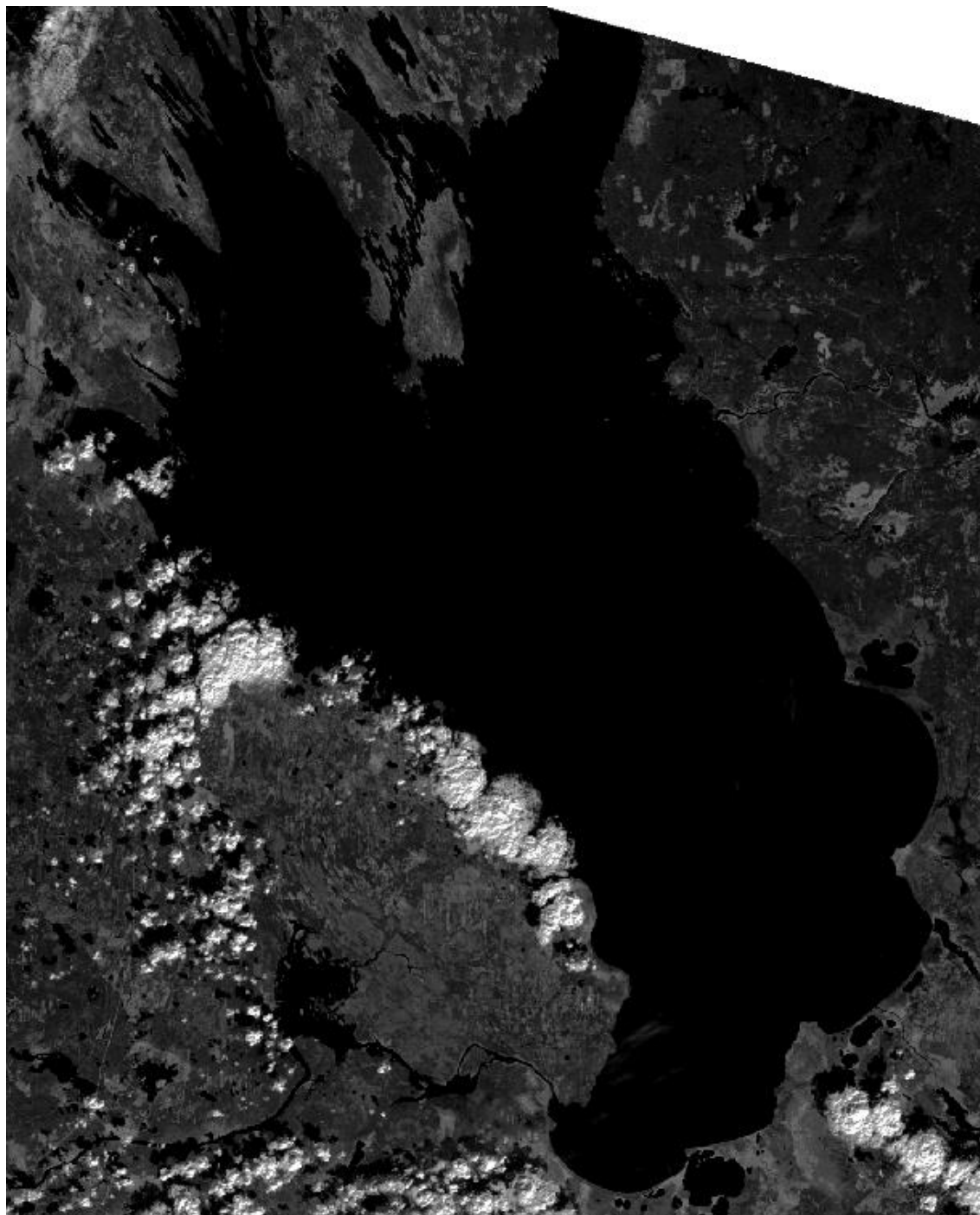




Приложение 3 – Космический снимок от 01.04.1985

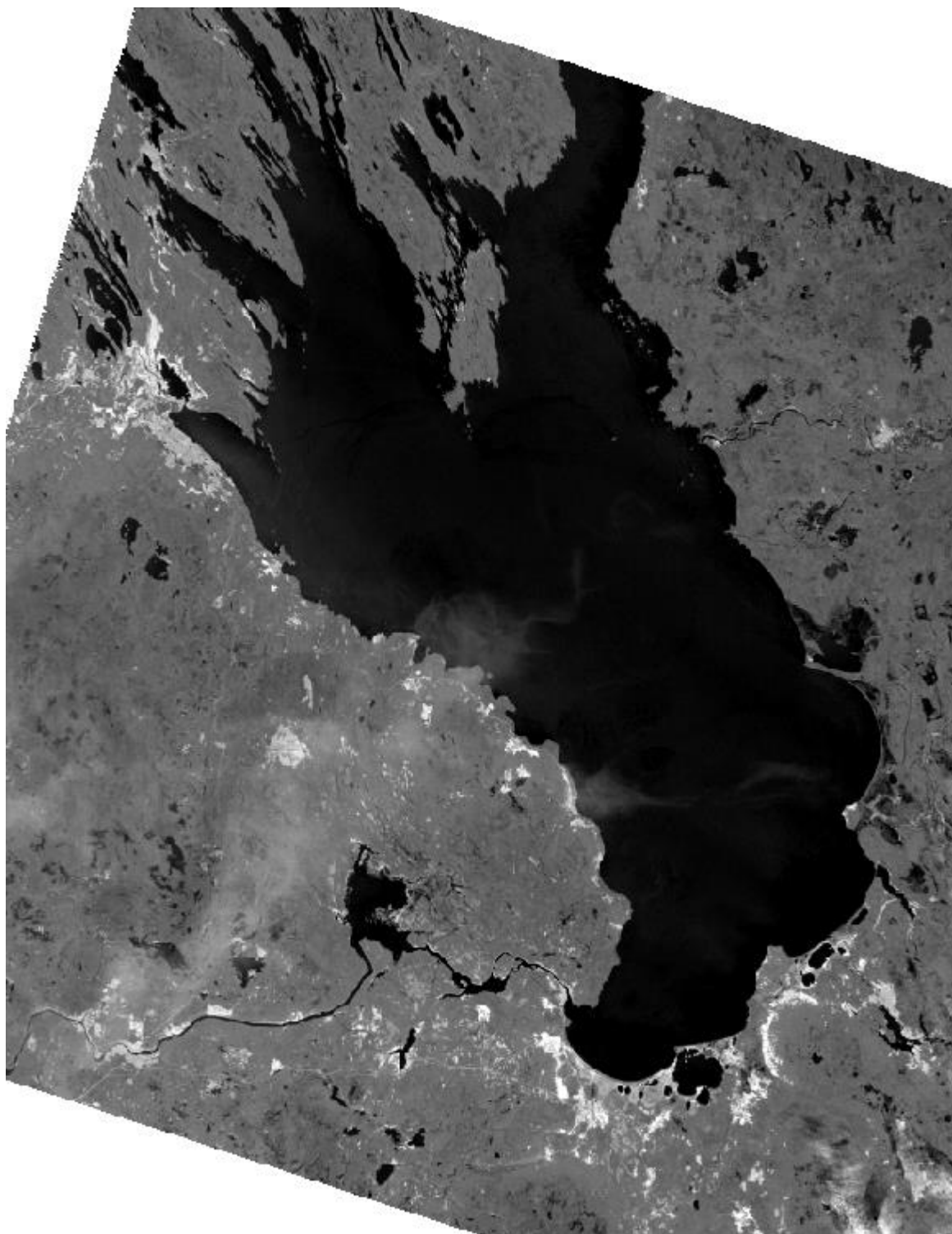


Приложение И – Космический снимок от 24.04.1990





Приложение Л – Космический снимок от 30.04.1998



Приложение М – Космический снимок от 15.03.1987





