



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 **Методика оценки прозрачности воды  
Ладожского озера с использованием  
спутниковых снимков**

Исполнитель Баранова Анастасия Романовна  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель К.Т.Н.  
(ученая степень, ученое звание)

Гайдукова Екатерина Владимировна  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
Заведующий кафедрой

К.Т.Н., доцент

(ученая степень, ученое звание)

Хаустов Виталий Александрович  
(фамилия, имя, отчество)

«06» 06 2022г.

Санкт-Петербург  
2022

	Стр.
	3
1	5
1.1	5
1.1.1	6
1.1.2	6
1.1.3	7
1.2	7
1.2.1	8
1.2.2	9
1.2.3	10
1.2.4	13
1.2.5	16
2	19
2.1	20
2.2	22
2.2.1	22
2.2.2	24
3	28
3.1	28
3.1.1	28
3.1.2	33
3.2	42
3.2.1	42
3.2.2	45
3.3	63
4	72
4.1	77
4.2	79
4.2.1	85
4.2.2	87
4.3	88
	92

Приложение А – Восстановленные значения прозрачности воды Ладожского озера после апробации формулы	94
Список использованных источников	99

## Введение

Ладожское озеро – безальтернативный источник водоснабжения Санкт-Петербурга. Для бесперебойного использования воды озера важно отслеживать ее качество.

Оценить состояние озера позволяет ежегодный экспедиционный мониторинг. Однако традиционных методов иногда недостаточно, а также они не всегда экономически выгодны. Поэтому решить эти проблемы можно путем внедрения спутникового мониторинга. Такой опыт имеется как у отечественных исследователей, так и у зарубежных.

Дистанционный мониторинг позволяет с большей дискретностью получать данные о всей акватории водного объекта, что дает ему преимущество над традиционным, так как экспедиционная деятельность не может осуществляться часто.

Целью исследования было вывести функциональную зависимость прозрачности Ладожского озера по данным со спутниковых снимков.

Для достижения поставленной цели было сформулированы следующие задачи:

- a) Изучить публикации по тематике исследования.
- b) Собрать данные натурных экспедиционных измерений прозрачности за 2021 год.
- c) Получить и обработать снимки спутников *Landsat 8* и *Sentinel-2*.
- d) Обработать натурные и спутниковые данные о прозрачности воды за 2021 год с целью получения зависимости, позволяющей получать характеристики прозрачности воды при отсутствии фактических данных.
- e) Проверить зависимости, полученные ранее, произвести их корректировку.

С развитием техники и технологий, дистанционный мониторинг, наряду с натурными измерениями, всё шире внедряется в практику, поэтому исследования в этом направлении актуальны.

Отдельно хочется поблагодарить доктора географических наук, профессора Михаила Арсеньевича Науменко за предоставленные им лично экспедиционные данные Ладожского озера по нужным для исследования годам.

# 1 Характеристика Ладожского озера и его водосбора

## 1.1. Физико-географическая характеристика водосбора

Ладожское озеро – крупнейшее пресноводное озеро Европы, расположенное на Северо-западе России, на территории Ленинградской области и Республики Карелия. Относится к бассейну Балтийского моря Атлантического океана.

Обширный водосборный бассейн Ладожского озера, общая площадь которого составляет 258 600 км<sup>2</sup>, расположен на территории Республики Карелии, Ленинградской, Новгородской, Псковской, Вологодской, Тверской и Архангельской областей России, а также на части территорий Финляндии и Беларуси (рис. 1.1).

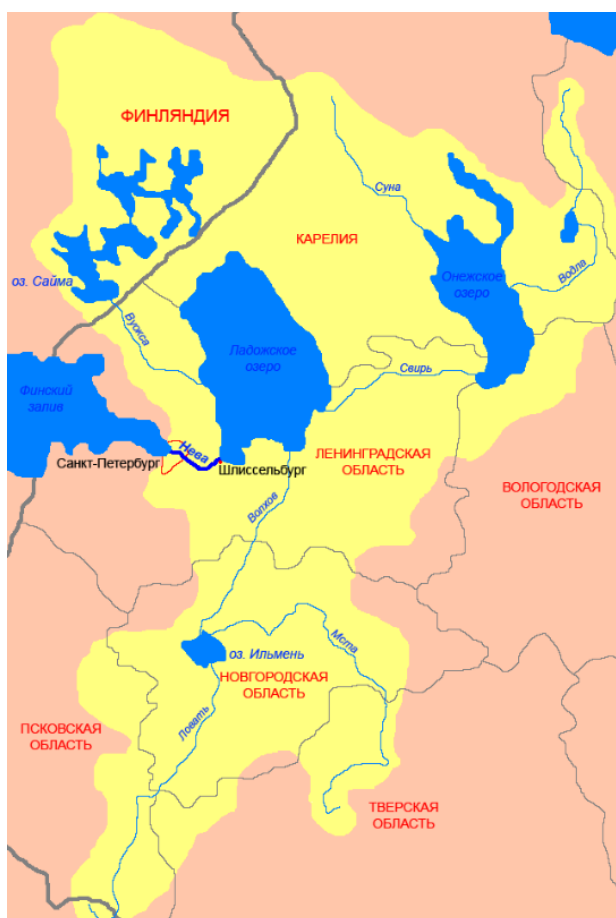


Рисунок 1.1 – Водосборный бассейн Ладожского озера.

### 1.1.1. Климатические особенности территории водосбора

Климат в районе Ладожского озера изменяется от умеренно-континентального до умеренно-морского. Сам водоем оказывает значительное влияние на климатические характеристики района, несколько сглаживая их экстремальные значения, что делает климат Северо-Западного района мягче. Погодные условия региона формируются под воздействием воздушных масс, поступающих с Атлантического океана, вследствие чего над Ладожским озером преобладают западные и юго-западные ветры. Средняя месячная скорость ветра преобладающего направления 6-9 м/с на озерных станциях и 4-8 м/с на береговых. В осенне-зимний период ветра могут достигать скорости более 30 м/с.

Среднегодовая температура воздуха в районе Ладожского озера +3,2 °С. Средняя температура самого холодного месяца (февраля) – 8,8 °С, самого тёплого (июля) +16,3 °С [1].

На Ладожском озере и его берегах осадки выпадают часто: число дней с осадками в году достигает 200. Среднемноголетняя годовая сумма жидких осадков составляет 380 мм в год, твердых – 226 мм.

### 1.1.2. Рельеф

Северная часть водосбора Ладожского озера расположена в пределах Балтийского кристаллического щита, южная – на Русской платформе. Рельеф северной части характерен чередованием скалистых сельговых гряд и межсельговых понижений, вытянутых с северо-запада на юго-восток. Значительную территорию северной части занимает Западно-Карельская возвышенность, ее высотные отметки колеблются от 200 до 400 м.

От Западно-Карельской возвышенности к Онежскому и Ладожскому озерам поверхность снижается до 90–100 м и начинает преобладать холмисто-равнинный рельеф с высотами 30–70 м.

Южная часть территории бассейна Ладожского озера представлена в основном равнинным рельефом с палеозойскими отложениями. Наибольшую площадь здесь занимает Ловать-Ильмень-Волховская низина, приуроченная к понижению в рельефе коренных девонских пород [2].

### 1.1.3. Почвы и растительность

Доминирующим типом почвообразования в бассейне Ладожского озера является подзолистый. Он наблюдается на северо-востоке бассейна, в области распространения подзоны северной тайги. По мере перехода к подзонам средней и южной тайги в почвах наряду с процессом подзолообразования протекает процесс накопления гумуса. В зависимости от интенсивности проявления каждого из этих процессов формируются дерново-подзолистые почвы разной степени оподзоливания, в основном дерново-средне- и сильноподзолистые почвы. В зоне хвойно-широколиственных лесов преобладает процесс гумусонакопления и развиты преимущественно дерново-слабоподзолистые почвы [2].

Поскольку бассейн Ладожского озера простирается в меридиональном направлении, зонирование проявляется в растительном покрове. Водосбор расположен в таежной зоне и зоне смешанных лесов. Наиболее характерными для этого района являются еловые леса, природа которых сильно варьируется с севера на юг – от черничных мхов средней тайги до южной тайги с дубовыми элементами в травяном покрове до сложных еловых лесов с листовым подлеском в зоне смешанных лесов.

### 1.2. Характеристика Ладожского озера

В Ладожское озеро впадает 19 рек, наиболее крупными из них являются Свирь с востока, Волхов и Сясь с юга и Вуокса с запада. Вытекает из озера только одна река – Нева.



### 1.2.1. Геологическое строение котловины

Котловина Ладожского озера имеет ледниковое тектоническое происхождение. В палеозойскую эпоху 300-400 миллионов лет назад вся территория современного Ладожского озера была покрыта морем. Современный рельеф возник благодаря активности ледникового покрова (последнее, валдайское оледенение закончилось около 12 тысяч лет назад).

Котловина озера представляет собой крупную депрессию, вытянутую в северо-западном направлении. Сложная морфология дна и большие глубины озера, наряду с другими факторами, оказали влияние на первоначальное формирование биоты Ладожского озера.

В северо-западной и северной частях озера берега, сложенные кристаллическими породами, высокие и сильно расчлененные. Западное и восточное побережья озера отличаются выровненностью, повсеместным преобладанием отлогих берегов с песчаными пляжами. Южное побережье представляет собой низменную равнину с тремя крупными мелководными заливами: бухта Петрокрепость (средняя глубина 4 м), Волховская губа (средняя глубина 8 м) и Свирская губа (средняя глубина 3 м) [1].

Рельеф дна Ладожского озера неровный. В основном глубины плавно увеличиваются в направлении с юга на север (рис.1.2.). Однако плавность уклона нарушается резким увеличением глубин, в результате чего были выявлены три вытянутые в меридиональном направлении глубоководные впадины. В южной части водоема преобладают глубины порядка 20–50 м, а в северной части – более 50 м. Западный берег менее приглубый, чем северный, глубины вдоль него равномерно увеличиваются с юга на север.

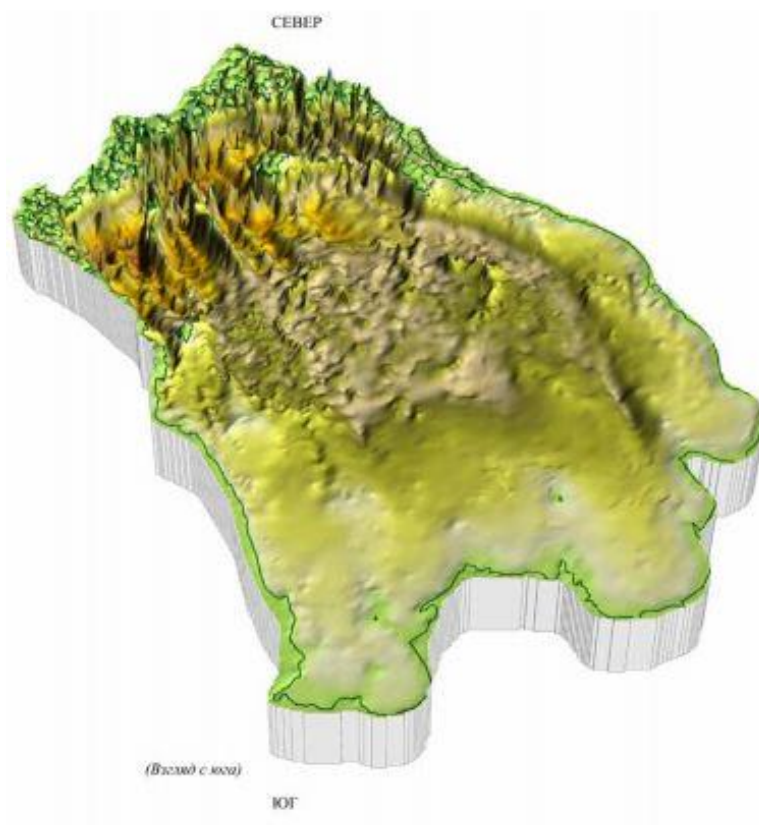


Рисунок 1.2 – Трехмерное изображение дна Ладожского озера.

### 1.2.2. Морфометрия

Ладожское озеро занимает площадь 18135 км<sup>2</sup>, наибольшая его длина в меридиональном направлении 219 м, наибольшая ширина 130 м при средней около 80 м. Если из общей площади вычесть острова, площадь зеркала озера составит 17678 км<sup>2</sup>.

Длина береговой линии, без учета длины береговой линии островов, составляет 1570 км, ее коэффициент изрезанности (отношение длины береговой линии к длине окружности круга, равновеликого площади озера) равен 3,28.

Котловина озера вмещает в себя 908 км<sup>3</sup> воды. Наибольшая глубина 230 м, средняя глубина около 51 м. Средний уклон дна озера равен 0,0105, а угол наклона 0°35', причем в северной части озера этот угол равен 1°52', в южной – только 0°03'. На рисунке 1.3 представлены гипсометрическая и объемная кривые.

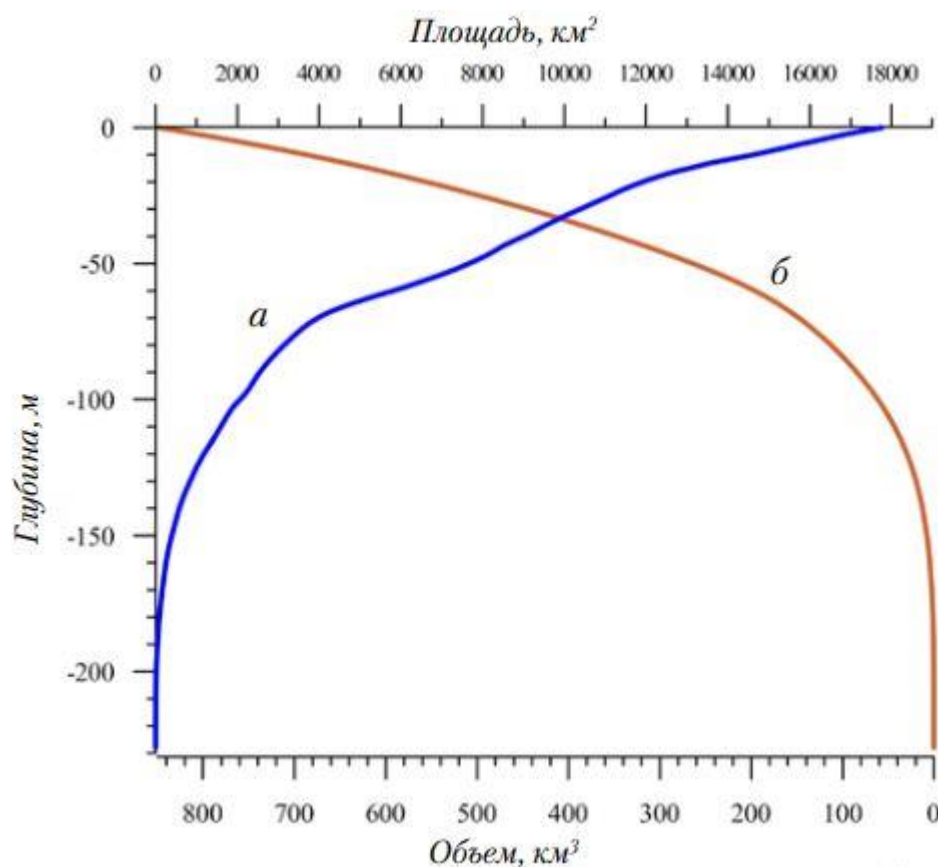


Рисунок 1.3 – Гипсометрическая (а) и объемная (б) кривые [1].

### 1.2.3. Лимнические зоны

В результате многолетних исследований Ладожского озера его акватория была разбита на четыре лимнические зоны (прибрежная, деклинальная, профундальная, ультрапрофундальная) (рис.1.4), каждая из которых характеризуется определёнными свойствами водной массы, играет особую роль в функционировании экосистемы в целом и имеет свою ценность с позиции водопользования.

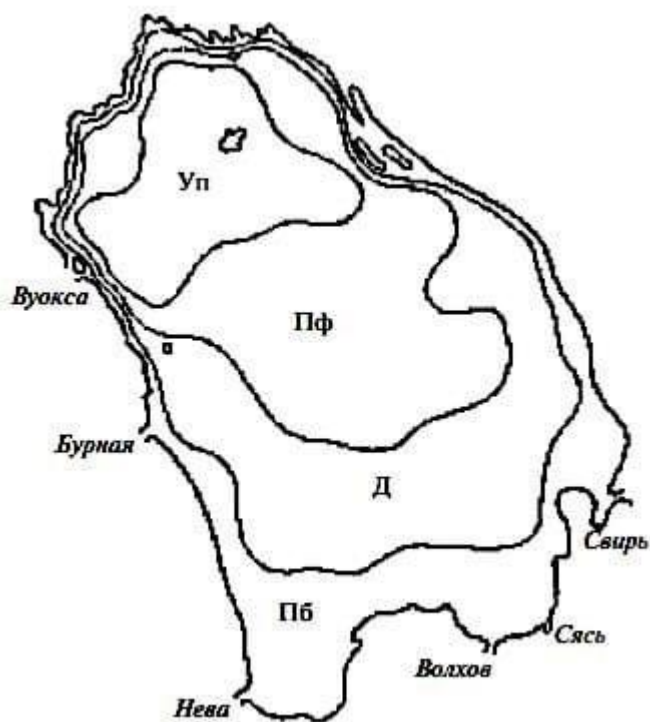


Рисунок 1.4 – Лимнические зоны Ладожского озера: Пб – прибрежная, Д – деклиральная, Пф – профундальная, Уп- ультрапрофундальная [3].

Для более подробного представления о районировании озера по глубинам далее приведена карта лимнических районов озера с указанием глубин (рис. 1.5).

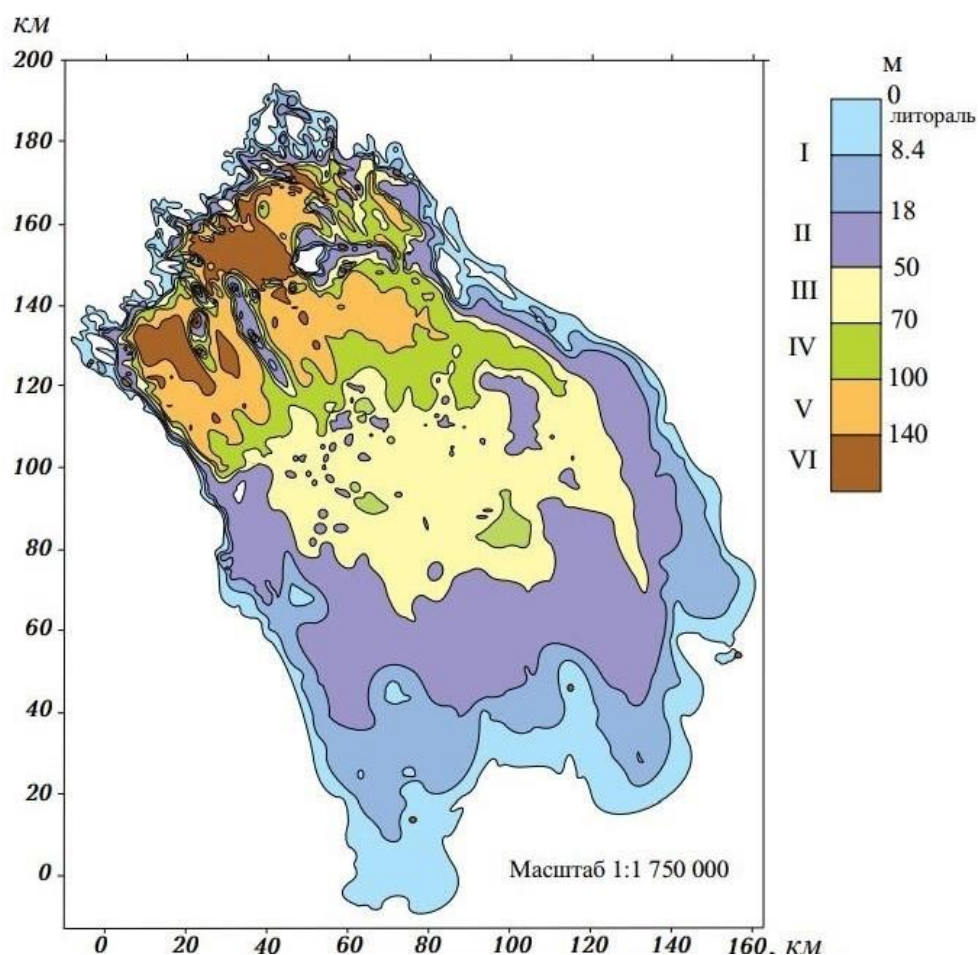


Рисунок 1.5 – Лимнические районы Ладожского озера.

В таблице 1.1. представлены характеристики лимнических районов озера, где  $H, м$  – диапазон глубин района,  $\gamma^\circ$  – уклон дна района.

Таблица 1.1. Характеристики лимнических районов озера

Район	Площадь, км <sup>3</sup>	Объем, км <sup>3</sup>	Характеристики	Среднее	Диапазон глубин $H, м$ и уклона $\gamma^\circ$
I	5465	46,7	$H, м$	8,8	0,0-18
			$\gamma, ^\circ$	0,22	0,0-6,8
II	4613	153,6	$H, м$	33,2	18-50
			$\gamma, ^\circ$	0,44	0,0-11,0
III	3693	221,1	$H, м$	59,9	50-70
			$\gamma, ^\circ$	0,44	0,0-8,5
IV	1910	158,4	$H, м$	82,9	70-100
			$\gamma, ^\circ$	0,81	0,0-11,1
V	1487	174,7	$H, м$	117,3	100-140
			$\gamma, ^\circ$	0,99	0,0-10,2
VI	577	93,3	$H, м$	161,9	140-230
			$\gamma, ^\circ$	1,16	0,0-11,8

Район	Площадь, км <sup>3</sup>	Объем, км <sup>3</sup>	Характеристики	Среднее	Диапазон глубин Н, м и уклона $\gamma^\circ$
Все озеро	17765,4	847,8	Н, м	48,3	0,0-230
			$\gamma,^\circ$	0,49	0,0-11,8

Сложное, неоднородное морфометрическое строение озера определяет особенности его гидрологического и термического режима.

#### 1.2.4. Термический режим

Ладожское озеро относится к димиктическим озерам, так как температура воды дважды в течение года, в период весеннего нагревания и осеннего охлаждения, достигает  $+4^\circ\text{C}$  – температуры наибольшей плотности, – что приводит к полному вертикальному перемешиванию и существованию термического бара. Термобар – это зона с большими горизонтальными градиентами температуры, отделяющая стратифицированные воды от квазиизотермических [Науменко, 1989, Науменко и др., 2012], ширина которой, в зависимости от горизонтального градиента температуры, может изменяться от 2 до 5 км. Термобар формируется в середине мая и существует до первой декады июля.

Около 200 дней в году средняя температура всей водной массы озера ниже  $+4^\circ\text{C}$ , она достигает максимальной, равной  $+7,8^\circ\text{C}$ , в первой декаде сентября. С середины августа-начала сентября начинается период охлаждения озера, причем южные мелководные районы начинают охлаждаться раньше, чем самые глубоководные области озера. В период охлаждения поверхностный слой воды полностью охвачен свободной конвекцией на фоне усиления волноветровой деятельности, способствующей формированию квазиоднородного слоя. Минимальная температура ( $+0,6^\circ\text{C}$ ) наблюдается в первую декаду апреля. Вертикальное распределение среднемесячной температуры воды для периода нагревания и охлаждения представлено на рис.1.6.

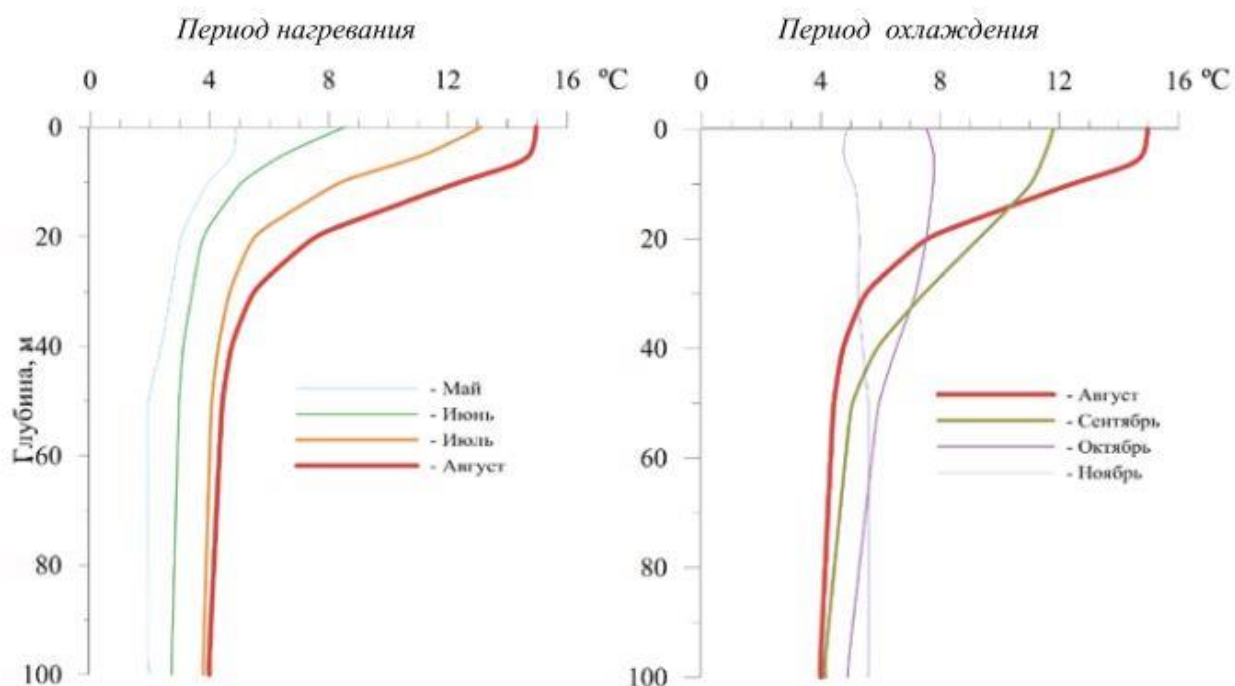


Рисунок 1.6 – Вертикальное распределение среднемесячной температуры воды для периода нагревания и охлаждения.

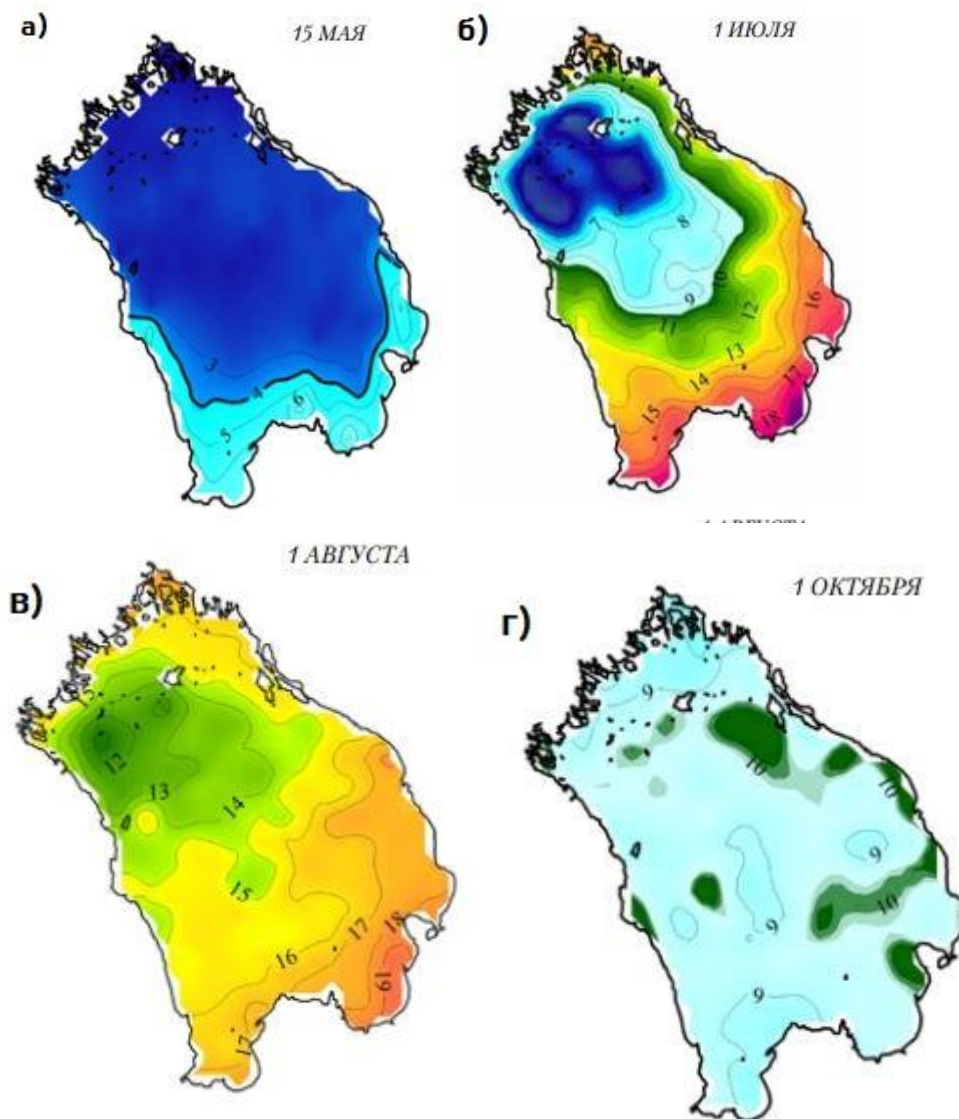
Вычисленные средние годовые значения температуры водной массы всего озера и его лимнических районов представлены в табл. 1.2. Эти значения свидетельствует о том, что значительное количество приходящего тепла идет на нагревание водной массы до температуры наибольшей плотности, т. е. на свободноконвективное перемешивание [2].

Таблица 1.2. Средние годовые значения температуры воды всего озера и его лимнических районов.

Гори-зонт	Лимнические районы						Все озеро
	I 0-18 м	II 18-50 м	III 50-70 м	IV 70-100 м	V 100-140 м	VI 140-230 м	
0 м	6	5,7	5,2	4,9	4,9	5,1	5,5
20 м	-	4	3,7	3,7	3,6	3,9	3,8
50 м	-	3,2	3,1	3	3,1	3,3	3,1
Водная масса озера	75% кван- тиль	6,9	5,2	4,1	3,9	3,9	4,4
	средняя	5,6	4,4	3,6	3,4	3,5	3,8

Гори- зонт	Лимнические районы						Все озеро
	I 0-18 м	II 18-50 м	III 50-70 м	IV 70-100 м	V 100-140 м	VI 140-230 м	
	25% квантил ь	4,7	3,7	3,2	2,9	3,1	

Так же для наглядности далее представлено пространственное распределение температуры поверхности воды за характерные месяцы (рис.1.7) [1].





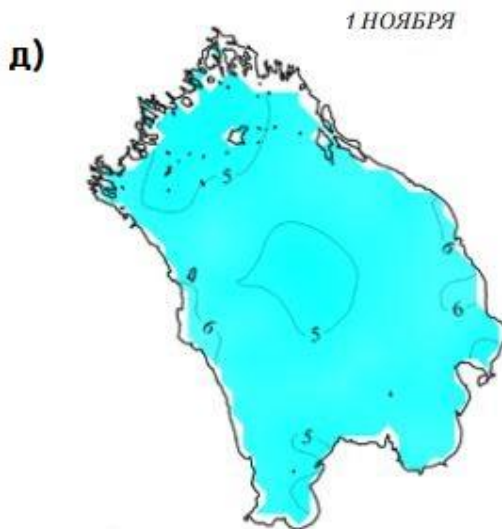


Рисунок 1.7 – Пространственное распределение температуры поверхности воды на первый день месяца: а) май; б) июль; в) август; г) октябрь; д) ноябрь.

Такие особенности Ладожского озера, как сложное геологическое строение и морфометрия, а так же свойственный озеру температурный режим и вносимый реками материал, обуславливают неравномерное прогревание всего водоема, разнообразие гидрофизических и разновременность биологических процессов и, как следствие, пространственно-временную изменчивость прозрачности.

#### 1.2.4. Прозрачность Ладожского озера

Прозрачность воды поверхностного слоя крупных озёр определяет глубину проникновения света, который является основой фотосинтеза автотрофных организмов [1]. За нижнюю границу фотического слоя принято принимать глубину проникновения в воду 1% света в полдень. Общепринятым основным показателем прозрачности верхнего слоя воды является глубина исчезновения белого диска (диска Секки  $D_s$ ) в метрах [4].

Среднее значение прозрачности за весь период наблюдений равно 2,9-3,0 м, а максимальное значение прозрачности не превышало 6,6 м. Наибольшая

прозрачность наблюдается в северной, наиболее глубоководной части озера и колеблется от 3 до 4,5 м и выше, наименьшая в юго-западной – 2 м и менее.

Распределение прозрачности зависит от времени года, определяющего периоды наибольшего стока воды с водосборного бассейна, температурный и ветровой режим, а также условия развития в озере микроорганизмов (планктона) [2].

В мелководном районе с глубинами до 18 м прозрачность практически не изменяется в течение безледоставного периода, что объясняется постоянной интенсивной волно-ветровой деятельностью, приводящей к взмучиванию донных отложений. Наименее прозрачной бухтой Ладожского озера является входящая в этот район Волховская губа – устье р. Волхов, которая приносит в озеро значительное количество взвешенных частиц. В глубоководной части озера с глубинами более 50 м прозрачность верхнего слоя озера минимальна в августе, причем наибольшие различия между среднемесячными значениями максимальной и минимальной прозрачности наблюдаются в самом глубоководном районе с глубинами более 140 м. Важно отметить, что максимальная прозрачность воды никогда не превышала 6,6 м на протяжении всего периода. Предположение Молчанова (1945) о том, что прозрачность может составлять 7-8 м, не подтвердилось.

Для построения среднемесячного распределения прозрачности воды Ладожского озера (рис.1.8.), специалистами Института Озероведения РАН были использованы 7085 измерений прозрачности по белому диску Секки за период открытой воды, начиная с 1905 года [5].

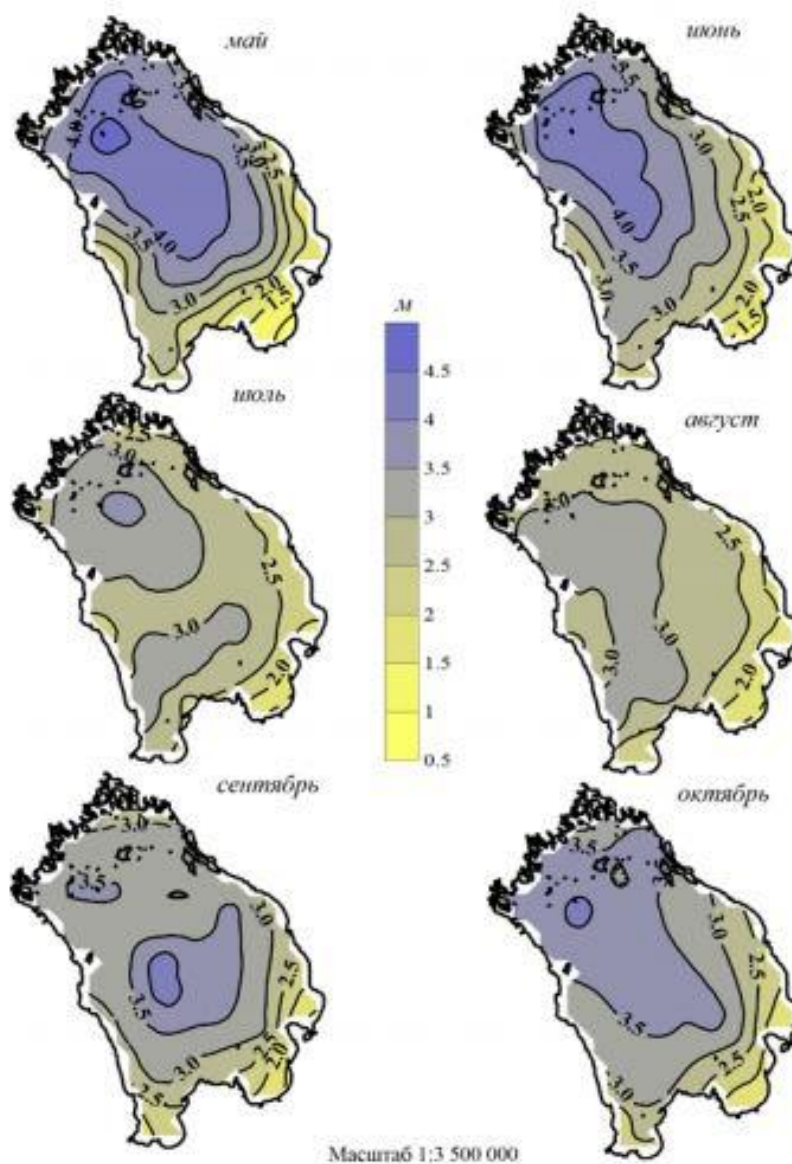


Рисунок 1.8 – Среднемесячное распределение прозрачности воды Ладожского озера (м).

С мая по июнь изменения прозрачности воды зональны и соответствуют распределению глубин озера, то есть с увеличением глубины по мере удаления от берегов прозрачность увеличивается. Наибольшие горизонтальные градиенты наблюдаются в мае, когда в глубоководной части озера с температурами менее  $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$  и малыми концентрациями общей взвеси, прозрачность достигает 4,5 м, а в Волховской губе – не более 1,5 м. В июне – июле, с увеличением прогрева озера, горизонтальные градиенты уменьшаются, так же как и прозрачность глубоководных районов озера. В этот период

пространственное распределение прозрачности уже не следует распределению глубин озера, а в значительной степени определяется уровнем развития биоты. Минимум прозрачности (так же как и наименьшие горизонтальные градиенты) имеет место в августе в связи с массовым развитием фитопланктона и с повышением доли органической взвеси в озере. В восточной части озера находится наибольшее количество притоков, которые со своим стоком несут в озеро органические вещества в виде окрашенных гуминовых соединений, из-за чего прозрачность воды на расстоянии нескольких километров от берега менее 2,5 м. Это значение может служить границей распространения вод притоков. Западная часть Ладожского озера характеризуется более высокими значениями прозрачности воды (до 3 м).

## 2. Мониторинг прозрачности

Прозрачность воды – это свойство воды пропускать вглубь световые лучи. От этой характеристики зависит световой режим глубин и интенсивность прогревания водных масс, оказывающие влияние на биологические процессы, которые происходят в водоёме. Прозрачность – основная оптическая характеристика воды озёр и водохранилищ.

Определение прозрачности воды является обязательным компонентом программ наблюдений за состоянием водных объектов. Все озерные станции и посты в РФ ведут наблюдения за относительной прозрачностью с помощью белого диска Секки, который представлен собой металлический круг диаметром 30 см, окрашенный в белый матовый цвет.

Определение прозрачности производится следующим образом:

- а) Опускают диск в воду с теневой стороны лодки.
- б) По меткам на веревке измеряют, на какой глубине диск скрылся из поля зрения.
- в) После этого диск опускают еще на 1 – 2 м.

d) Спустя 5 - 10 секунд начинают медленно поднимать диск и замечают глубину, на которой он стал виден.

e) Среднее из этих отсчетов и будет показателем прозрачности воды в метрах.

При большой прозрачности вода приобретает интенсивный синий цвет. При наличии значительного количества взвешенных частиц, сильно рассеивающих свет, вода имеет сине-зелёный или зелёный цвет, характерный для прибрежных районов и некоторых мелководных морей. В местах впадения крупных рек, несущих большое количество взвешенных частиц, цвет воды принимает жёлтые и коричневые оттенки.

## 2.1. Мониторинг прозрачности вод Ладожского озера

Научно-исследовательскую деятельность на Ладожском озере осуществляют несколько организаций.

ФГБНУ «ВНИРО» – старейшее научное рыбохозяйственное учреждение России. Оно ведет свое начало от лаборатории специалистов рыбного дела, организованной в 1914 г. при Департаменте земледелия. С 2017 г. – Федеральное государственное научное учреждение «Государственный научно-исследовательский институт озерного и речного рыбного хозяйства им. Л.С. Берга».

В соответствии с Государственным заданием институт выполняет «Осуществление государственного мониторинга водных биологических ресурсов во внутренних водах, в территориальном море Российской Федерации, на континентальном шельфе Российской Федерации и в исключительной экономической зоне Российской Федерации, в Азовском и Каспийском морях». Ежегодно организуются экспедиции для комплексного изучения водных биологических ресурсов и среды их обитания в Ладожском озере.

Задачами экспедиций, проводимых сотрудниками института, является сбор гидробиологических материалов с целью оценки состояния компонентов биоты, а также анализ проб донных отложений для оценки экологического состояния среды обитания водных биологических ресурсов в озере. Для характеристики среды обитания водных биоресурсов выполняются также гидрологические наблюдения, включая зондирование водной толщи.

Другой организацией, производящей исследования на Ладожском озере является Институт озероведения РАН (ИНОЗ РАН). Институт занимается развитием лимнологии, восстановлением озер и водохранилищ, их использования для целей питьевого водоснабжения, рыбоводства и рекреации, решением проблем мониторинга и управления озерами, рационального использования их природных ресурсов.

Институт был сформирован на базе Лаборатории Озероведения, организованной в 1944 г. по инициативе выдающегося ученого-лимнолога Г.Ю. Верещагина в составе Отделения Геолого-географических наук АН СССР. В 1971 г. Лаборатория преобразована в Институт озероведения (ИНОЗ), который в настоящее время входит в состав Отделения наук о Земле РАН.

Наблюдения Институтом озероведения велись с 1956 г. на станциях постоянной сети, включающей 114 точек, равномерно распределённых по акватории озера, в том числе 21 точку наблюдений, выполняемых в процессе мониторинга, и 7 станций для проведения комплексных наблюдений на продольном разрезе озера. В результате были получены данные по пространственному и сезонному распределению гидрологических характеристик, гидрохимических и гидробиологических процессов и изучена их взаимосвязь в озёрной экосистеме.

Так как экспедиционный мониторинг не всегда экономически выгоден, а также не может оснащать данными круглый год, используются методы дистанционного мониторинга водных объектов.

## 2.2. Дистанционный мониторинг

### 2.2.1. Общие сведения

Под дистанционным мониторингом подразумевается авиационный или космический мониторинг, а также мониторинг с помощью приборов, установленных в труднодоступных местах Земли, показания которых передаются в центры наблюдения с помощью методов дальней передачи информации: радио, проводам, через спутники и т.п. Такой мониторинг позволяет намного быстрее получать нужную информацию об объекте исследования, что даёт ему преимущество над экспедиционным мониторингом.

Использование дистанционного зондирования и ГИС в мониторинге и управлении водными ресурсами давно признано. Однако применение дистанционного зондирования и ГИС конкретно в мониторинге параметров качества воды такие как взвешенные вещества, фитопланктон, мутность, прозрачность и растворенные органические вещества обсуждается и по сей день. Фактически такие технологии предлагают отличные инструменты для того, чтобы мониторинг качества воды мог быть реализован в этой области. Потенциальное применение и управление определены в продвижении концепции устойчивого использования водных ресурсов.

Мониторинг и оценка могут быть полезны для целей исследований и разработки новых инструментов исследований. *In situ* измерения и сбор проб воды для последующего лабораторного анализа часто используются для оценки качества воды. Однако, так как эти измерения соответствуют моменту времени и пространства, они не дают ни пространственного, ни временного представления качества воды на большой территории. Таким образом, такие технологии, как дистанционное зондирование и ГИС, очень полезны в качестве инструмента оценки и мониторинга качества воды.

Для дистанционного зондирования (ДЗ) используют материалы, которые объединяют по типу данных, получаемых с носителей:

– космические (пилотируемые орбитальные станции, корабли многоцелевого использования, автономные спутниковые съемочные системы и т.п.);

– авиационного базирования (самолеты, вертолеты и микроавиационные радиоуправляемые аппараты);

– разнообразные методы морского (наводного) и наземного базирования, включая, например: сейсмо, электромагниторазведку и иные методы геофизического зондирования недр, основанные на регистрации собственного или отраженного сигнала волновой природы.

Съемки ведут в видимой, ближней инфракрасной, тепловой инфракрасной, радиоволновой и ультрафиолетовой зонах спектра. При этом снимки могут быть черно-белыми, цветными, цветными спектрально-зональными. Главными достоинствами космических снимков и цифровых данных, получаемых в ходе дистанционного зондирования, являются достаточно большой охват территории и одномоментность. Другими словами они покрывают обширные территории земной поверхности, поверхности озер, морей и океанов в один момент времени и в одинаковых физических условиях. Благодаря повторности съёмок на одной и той же территории, появляется возможность проследить динамику изменения состояния водного объекта или территории суши.

Еще одним достоинством ДЗ является возможность получения информации об объектах, недоступных для исследования другими способами.

Но у дистанционных методов, в частности, у космической съемки есть так же и недостатки.

Поскольку площадь поверхности Земли достаточно велика, так же как и разрешение аппаратуры спутниковой фотосъемки, то базы данных спутниковых снимков получаются очень объёмными (десятки и сотни терабайт), а обработка снимков занимает слишком много времени.



Кроме того, фотоаппаратура, установленная на спутниках, довольно чувствительна к погодным условиям, что существенно влияет на качество снимков.

Если с описанными выше проблемами достаточно легко справиться, то следующие не так просто решаемы. Во-первых, только небольшой процент изображений со спутников находится в общем доступе с дальнейшей возможностью скачать и использовать для собственных целей, так как компании, запускающие коммерческие спутники, предлагают каждому лицензировать полученные от них изображения. Во-вторых, снимки некоторых участков земли нельзя найти вообще, так как эта информация является государственной тайной или личной информацией.

### 2.2.2. Используемые спутники

В настоящее время в космос выведено более 500 спутников дистанционного зондирования Земли. Спутники принадлежат разным странам, имеют различные характеристики, разрешение съёмки и т.д.

При выборе спутников нужно было учитывать некоторые условия:

- a) Спутник должен быть многоспектральным, в частности для работы нужны 2, 3, 4 каналы;
- b) Чем меньше разрешение спектральных каналов, тем четче будет изображение, поэтому оптимальное разрешение составляет 15-100 м;
- c) Полоса съёмки должна быть как можно шире, это упростит дальнейшую обработку снимков;
- d) Периодичность съёмки. Так как в работе материалы дистанционного зондирования используются вместе с натурными наблюдениями, то чем меньше периодичность, тем точнее можно совместить даты съёмки и даты экспедиции;

е) Доступность снимков. Как отмечалось ранее, сложно найти и скачать нужные снимки, так как в свободном доступе находится малая часть спутниковой информации.

Для определения прозрачности Ладожского озера использовались снимки двух спутников: *Landsat-8* и *Sentinel-2*.

### 1. *Landsat 8*

*Landsat 8* был запущен 11 февраля 2013 г. с Военно-воздушной базы Ванденберг, Калифорния на ракете Atlas-V. Спутник несет на себе оптико-электронный тепловизор (Operational Land Imager, OLI) и тепловой инфракрасный датчик (Thermal InfraRed Sensor, TIRS) [6] *Landsat 8* получает изображения в видимом диапазоне волн, в ближнем ИК и в дальнем ИК, с разрешением снимков от 15 до 100 метров на точку (таблица 2.1.). Производится съемка суши и полярных регионов. В сутки снимается около 400 сцен. Спутник обеспечивает умеренное пространственное разрешение, глобальный, синоптический и повторяющийся охват всей земной поверхности суши. Программа *Landsat* непрерывно предоставляет космические данные дистанционного зондирования земли с умеренным разрешением на протяжении четырех десятилетий.

Таблица 2.1 – Технические характеристики каналов спутниковой аппаратуры *Landsat 8* [7].

Режим съёмки	VNIR					SWIR			PAN
Спектральные каналы	1	2	3	4	5	6	7	9	8
Спектральный диапазон, мкм	0,43-0,45	0,45-0,51	0,52-0,60	0,63-0,68	0,84-0,88	1,56-1,66	2,10-2,30	1,36-1,39	0,50-0,68

Изображения, полученные со спутника, используются во многих различных приложениях в области сельского хозяйства, лесного хозяйства,

геологии, гидрологии, регионального планирования, образования, картографии и глобальных изменений землепользования / растительного покрова. *Landsat 8*, по сравнению с предшественником, улучшил свои функции, а также ввел новые диапазоны для более точных исследований в более широких областях. Он предлагает больше комбинаций с более узкой классификацией.

## 2. *Sentinel-2*

*Sentinel-2* – это семейство спутников дистанционного зондирования Земли Европейского космического агентства. Первый спутник, *Sentinel-2A*, запущен 23 июня 2015 г. Запуск второго спутника, *Sentinel-2B*, произведён 7 марта 2017 г. Спутники предназначены для мониторинга использования земель, растительности, лесных и водных ресурсов, также могут применяться при ликвидации последствий стихийных бедствий.

Пара спутников *Sentinel-2* регулярно поставляет космические снимки высокого разрешения на всю Землю, проводя повторные съемки каждые 5 дней на экваторе и каждые 2-3 дня в средних широтах, обеспечивая непрерывное получение данных с характеристиками, аналогичными спутникам *SPOT* и *Landsat*.

*Sentinel-2* оснащен оптико-электронным мультиспектральным сенсором для съемок с разрешением от 10 до 60 м в видимой, ближней инфракрасной (VNIR) и коротковолновой инфракрасной (SWIR) зонах спектра, включающих в себя 13 спектральных каналов, что гарантирует отображение различий в состоянии растительности, в том числе и временные изменения, а также сводит к минимуму влияние атмосферы на качество съемки.

Уникальность миссии *Sentinel-2* определяется большим охватом территории, частыми повторными съемками, и, как следствие, систематическим получением полного покрытия всей Земли мультиспектральной съемкой высокого разрешения (таблица 2.2.).

Миссия Copernicus Sentinel-2 состоит из созвездия двух спутников с полярной орбитой, расположенных на одной солнечно-синхронной орбите, поэтапно под углом 180 ° друг к другу [8]. Он направлен на мониторинг изменчивости условий поверхности земли, а его широкая ширина полосы (290 км) и высокое время повторного посещения (10 дней на экваторе с одним спутником и 5 дней с 2 спутниками в безоблачных условиях, что приводит к 2–3 дням в средних широтах) будут поддерживать мониторинг земной поверхности.

Таблица 2.2 – Технические характеристики каналов спутниковой аппаратуры Sentinel-2 [9].

Режим съёмки	VNIR										SWIR		
Спектральные каналы	1	2	3	4	5	6	7	8	8a	9	10	11	12
Спектральный диапазон, мкм	0,44	0,49	0,56	0,66	0,77	0,74	0,78	0,84	0,86	0,94	1,38	1,61	2,19

В таблице 2.3. приведены сравнительные характеристики двух выбранных спутников.

Таблица 2.3 – Характеристики спутников Landsat 8 и Sentinel-2.

Спутник	Страна	Дата запуска	Число каналов	Ширина полосы съёмки, км	Периодичность съёмки, сутки	Разрешение актуальных каналов, м
Landsat 8	США	20.02.13	11	185	16	15-100
Sentinel-2	Страны Европы	23.06.15	13	290	2-5	10-60

### 3 Обработка и анализ данных

#### 3.1. Обработка данных

##### 3.1.1. Обработка экспедиционных данных

Для оценки прозрачности по спутниковым снимкам помимо данных дистанционного зондирования требуются данные натуральных наблюдений на озере. Как было сказано ранее, научно-исследовательскую деятельность, то есть экспедиционный мониторинг на Ладожском озере ведут, среди прочих, две организации: ФГБНУ «ВНИРО» и Институтом озероведения РАН. Данные для работы были предоставлены лично М.А. Науменко, доктором географических наук, профессором, заведующим лабораторией гидрологии ИНОЗ РАН.

Было принято решение вести исследования за 2017 и 2019 года, так как за эти года информация была наиболее полной.

В ходе экспедиций на Ладожском озере в точках по всему озеру, либо в какой-либо его части ведутся гидрохимические, гидробиологические и гидрологические измерения. Для работы нужны: номера и координаты точек мониторинга на озере (широта, долгота), глубина в точке (м), прозрачность по диску Секки (м), дата съемки (если есть). В таблице 3.1 представлены характеристики за 2017 г, информация за 2019 г находится в таблице 3.2.

Таблица 3.1 – Данные по мониторингу за 24.07–02.08.2017 года.

№	Дата	Долгота	Широта	Глубина, м	Прозрачность, м
1	24.07.2017	32,79155	60,56993	9	1,4
2	25.07.2017	32,57093	60,71497	20	1,8
3	25.07.2017	32,09492	60,8082	50	2
4	25.07.2017	32,16545	60,71367	39	1,5
5	25.07.2017	32,38335	60,48482	30	1,5
6	25.07.2017	32,4749	60,20215	9	1,8
7	26.07.2017	32,3534	60,16128	7	0,4
8	26.07.2017	32,27595	60,2409	8	2,9
9	26.07.2017	32,13077	60,32655	10	2,5
10	26.07.2017	32,06628	60,588	42	2,1

№	Дата	Долгота	Широта	Глубина, м	Прозрачность, м
11	26.07.2017	31,91608	60,90675	37	2,5
12	26.07.2017	31,6106	60,50418	36	2,1
13	27.07.2017	31,13713	60,38972	22	2,7
14	27.07.2017	31,49097	60,39992	24	3
15	27.07.2017	31,30668	60,15003	6,5	3
16	27.07.2017	31,24345	60,01637	6,5	2,5
17	28.07.2017	30,94047	60,36023	18	2,2
18	28.07.2017	30,70832	60,60337	17	1,7
19	28.07.2017	30,7065	60,7618	38	2,3
20	28.07.2017	30,63537	60,68733	31	2,1
21	28.07.2017	30,55562	60,61927	6	1,5
22	29.07.2017	31,53405	60,78448	70	1,7
23	29.07.2017	31,29085	60,82983	61	2,7
24	29.07.2017	31,34662	60,92285	74	2,7
25	29.07.2017	31,15028	60,98652	68	2,6
26	29.07.2017	31,0548	60,87373	67	2,3
27	30.07.2017	30,5848	60,96313	110	2,8
28	30.07.2017	31,01625	61,16128	135	2,1
29	30.07.2017	30,9531	61,22172	146	2,3
30	30.07.2017	31,0918	61,26465	96	2,2
31	31.07.2017	30,31167	61,04933	120	2,5
32	31.07.2017	30,09355	61,09357	35	2,6
33	31.07.2017	30,1972	61,15652	210	2
34	31.07.2017	30,5959	61,39065	188	2,5
35	01.08.2017	31,4578	61,5456	35	2,5
36	01.08.2017	31,35022	61,40967	86	2
37	01.08.2017	30,89867	61,56928	190	1,7
38	01.08.2017	31,4248	61,33365	103	2
39	01.08.2017	31,07202	61,59042	89	1,7
40	01.08.2017	31,4044	61,53668	32,5	1,6
41	01.08.2017	31,45462	61,5724	7,5	1,5
42	02.08.2017	31,51187	61,21915	104	2,2
43	02.08.2017	31,48552	61,06058	82	2,4

Таблица 3.2 – Данные по мониторингу за 15.07-23.07.2019 года.

№	Долгота	Широта	Глубина, м	Прозрачность, м
0	31,04898	61,39322	36	3
1	31,10505	61,36886	77	2,6
2	31,1693	61,37549	57	2,8

№	Долгота	Широта	Глубина, м	Прозрачность, м
3	31,23672	61,38811	60	2,5
4	31,29411	61,39463	52	2,7
5	31,39474	61,42012	80	2,4
6	31,44425	61,43624	110	3
7	31,51348	61,44277	29,5	3,9
8	31,5296	61,44138	19	3,3
9	31,43693	61,4737	79	3
10	31,39058	61,45687	130	2,7
11	31,34058	61,45395	77	3
12	31,27182	61,43401	108	2,3
13	31,206	61,42252	89	2,3
14	31,14158	61,40544	50	3,9
15	30,99338	61,42999	30	2,4
16	31,03292	61,42556	65	3
17	31,12387	61,45072	83	3,2
18	31,18386	61,47005	58	2,7
19	31,23965	61,48788	80	2,4
20	31,37486	61,51911	35	3,9
21	31,30959	61,55491	31	2,6
22	31,25351	61,53372	103	2,6
23	31,20666	61,51812	38	2,5
24	31,14019	61,50561	57	2,7
25	31,06992	61,48801	75	2,8
26	30,97006	61,47973	130	2,9
27	30,92736	61,45349	37	2,6
28	30,81852	61,40415	170	2,9
29	30,5923	61,35809	45	3
30	30,42391	61,3242	17	2,7
31	30,35072	61,30472	107	3,1
32	30,40681	61,36933	120	3
33	30,389	61,43786	81	2,7
34	30,50627	61,44155	170	2,7
35	30,52151	61,48521	103	3
36	30,5032	61,50352	50	2,6
37	30,65558	61,48423	158	3,1
38	30,66224	61,49053	150	2,9
39	30,67708	61,49644	130	3,2
40	30,71842	61,49268	105	2,9
41	30,73923	61,50142	76	3,1
42	30,72926	61,50298	109	2,7
43	30,70727	61,50323	102	3
44	30,70267	61,51086	135	2,9

№	Долгота	Широта	Глубина, м	Прозрачность, м
45	30,67737	61,53673	24	2,6
46	30,71418	61,53555	142	2,7
47	30,73237	61,5281	85	2,8
48	30,74159	61,53185	152	3,4
49	30,73722	61,5456	117	2,7
50	30,7046	61,56108	33	2,4
51	30,79154	61,5202	138	3,2
52	30,80659	61,52186	120	2,6
53	30,83346	61,52078	117	3,3
54	30,80774	61,53073	143	3
55	30,77106	61,55708	120	2,9
56	30,79314	61,55458	120	2,9
57	30,80347	61,54925	165	2,9
58	30,80906	61,55735	103	2,9
59	30,80411	61,59049	88	2,6
60	30,83308	61,56654	47	2,6
61	30,89214	61,5228	75	2,8
62	30,95771	61,50561	38	2,7
63	30,88065	61,49775	137	2,7
64	30,8566	61,48807	117	3
65	30,65337	61,42433	181	3,1
66	30,52247	61,38905	174	2,7
67	30,56418	61,307	57	2,8
68	30,43992	61,28543	51	3,5
69	30,27031	61,19729	159	3,4
70	30,39641	61,21312	45,7	2,7
71	30,52467	61,25607	114	3,7
72	30,62637	61,2713	47	3,7
73	30,76352	61,32938	133	2,5
74	30,80917	61,31161	160	2,5
75	30,89192	61,33399	131	2,5
76	30,82398	61,35853	153	2,9
77	30,88155	61,37304	17	2,7
78	30,9066	61,46336	20	2,3
79	31,1472	61,3982	39	2,5
80	30,68776	61,69914	5	2,7
81	30,7217	61,61853	35	2,8
82	30,85926	61,57446	130	3,1
83	31,04369	61,53733	51	3,4
84	31,16992	61,57222	59	3,1
85	31,20189	61,60054	50	3,7
86	31,05038	61,60268	50	2,4



№	Долгота	Широта	Глубина, м	Прозрачность, м
87	31,06422	61,63869	60	2,3
88	31,00801	61,66647	24	2,1
89	30,97256	61,60637	46	2,4
90	30,8583	61,6148	77	2,7
91	30,77582	61,60167	73	2,5
92	30,67523	61,64487	44	1,9

На рисунках 3.1 и 3.2 представлено расположение станций мониторинга Ладожского озера в 2017 и 2019 гг. соответственно.

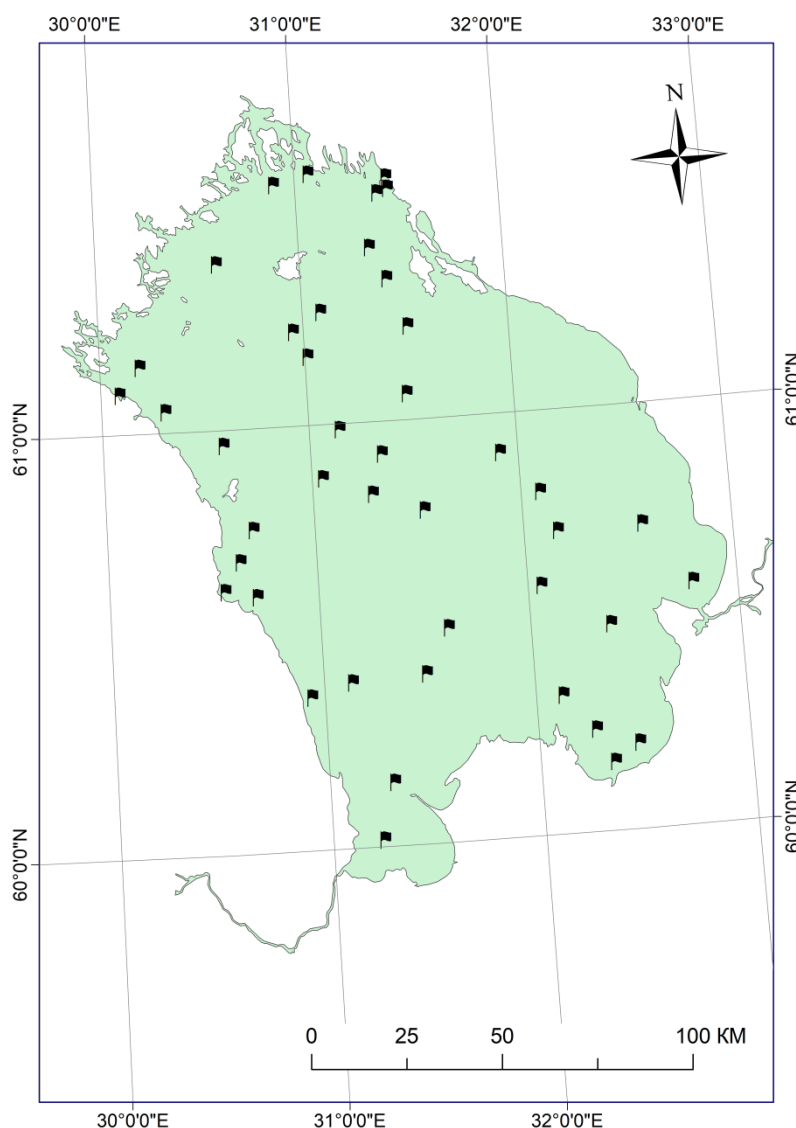


Рисунок 3.1 – Станции мониторинга Ладожского озера, 2017 год.

Точки мониторинга распределены равномерно по всей акватории озера, как в мелководных районах, так и в глубоководной части.

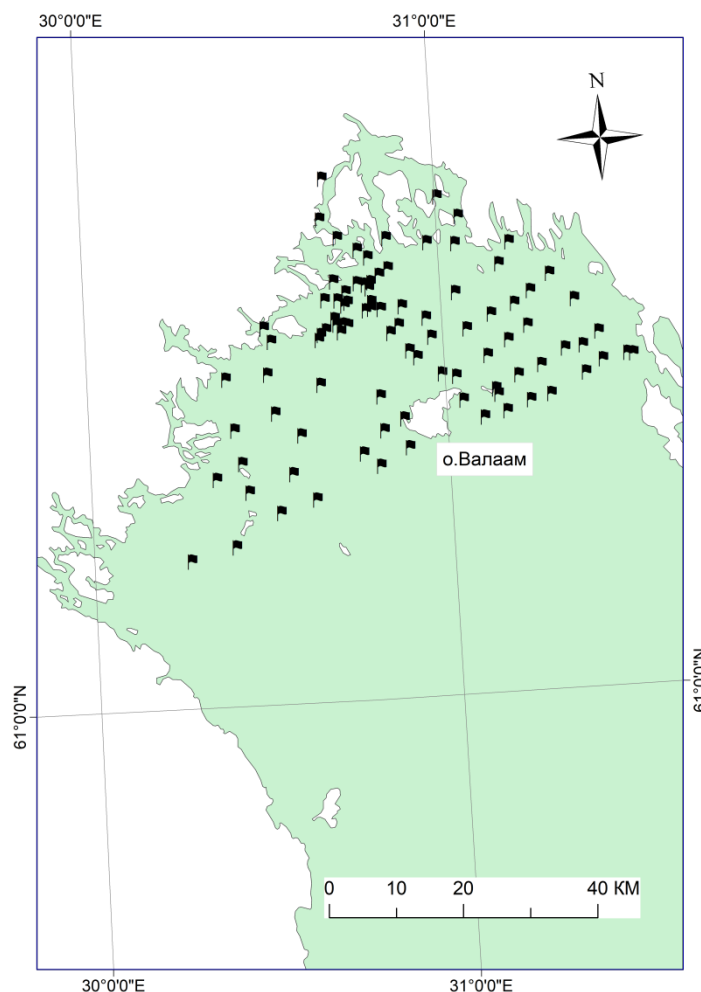


Рисунок 3.2. Станции мониторинга Ладожского озера, 2019 год.

В 2019 году мониторинг проводился в северной части озера, но, несмотря на это исследования производились и в мелководных местах.

### 3.1.2. Получение и обработка данных дистанционного мониторинга со спутников *Landsat 8* и *Sentinel-2*

После того, как в результате сравнительного анализа для работы были выбраны спутники *Landsat 8* и *Sentinel-2*, нужно было найти источники бесплатных спутниковых снимков. В свободном доступе, с возможностью скачать и использовать, снимки за даты экспедиций (отклонение от дат 3-7 дней) размещены на следующих платформах: для спутника *Sentinel-2* на сайте Copernicus [10]; для *Landsat 8* на EarthExplorer USGS (Геологической службы США) [11] (рисунок 3.3).

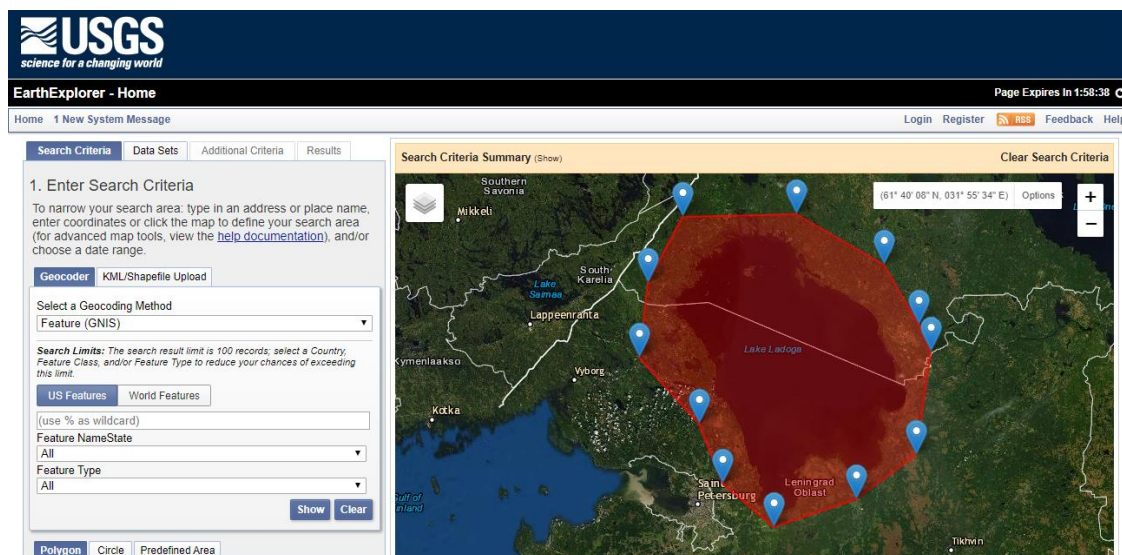


Рисунок 3.3 – Интерфейс сайта Геологической Службы США.

Так как Ладожское озеро – крупный водный объект, а спутники снимают полосами, шириной до 300 км, то для охвата всей площади озера, потребовалось скачать несколько снимков, чтобы в дальнейшем получить целостную картину (рис. 3.4.). В результате загрузки снимков созданы архивы (их число равно количеству снимков), в каждом из которых набор каналов, который соответствует спутнику.

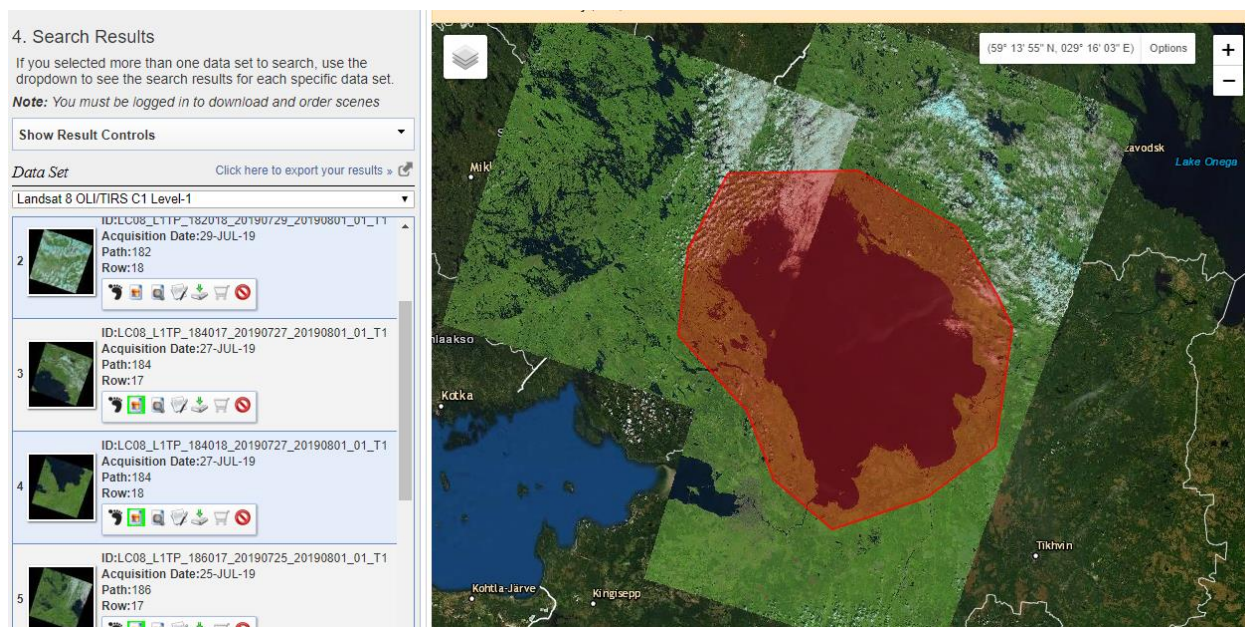


Рисунок 3.4 – Компонка снимков Ладожского озера на сайте EarthExplorer USGS.

Обработка данных со спутника выполнялась с помощью геоинформационной системы ArcGIS. Данная ГИС наиболее удобна и оснащена всеми нужными инструментами для обработки снимков.

Конечной задачей при обработке спутниковых снимков было извлечь данные отдельных каналов в точках экспедиционного мониторинга для дальнейшей оценки. Работа проводилась по двум годам отдельно для разных спутников. Для выполнения задачи снимки поканально сшивались для получения всей акватории озера (рис. 3.5). Далее на готовый снимок наносились точки экспедиций за нужный год и извлекались данные по спектральным каналам в этих точках.

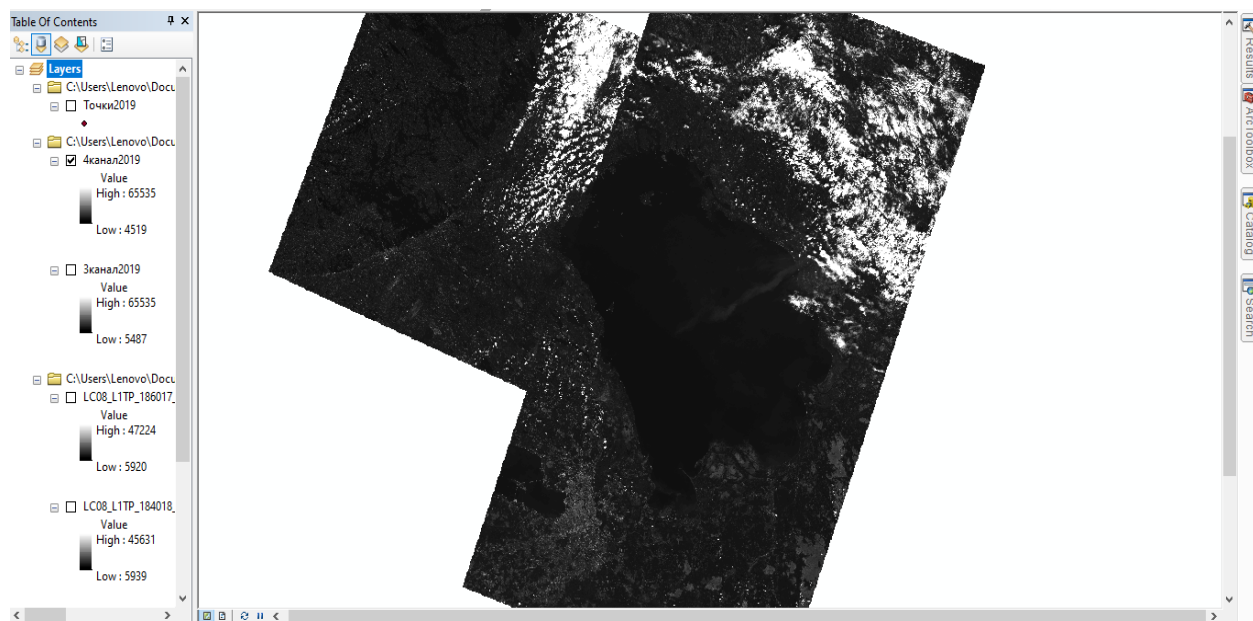


Рисунок 3.5 – Канал 4 после компановки снимков Landsat 8, 2019 г.

На основании исследований в области дистанционного мониторинга, проводимых в нашей стране [12] и за рубежом [13], [14], [15] на различных водных объектах, для последующей оценки прозрачности были выбраны три канала: 2 (синий), 3 (зеленый), 4 (красный).

Таким образом, после обработки спутниковых данных, формируется таблица с номерами точек, их координатами, измеренной глубиной, измеренной прозрачностью и данными по каналам, извлеченными со снимков. Таблицы с

результатами обработки снимков за два года по двум спутникам находятся в таблицах 3.3 и 3.4.

Таблица 3.3 – Результаты обработки снимков спутника Landsat 8 за 2017 и 2019 года.

2017 год							
№	Долгота	Широта	Глубина	Прозрачность	4 канал	3 канал	2 канал
1	32,7916	60,5699	9	1,4	6039	6661	7948
2	32,5709	60,715	20	1,8	11558	11601	12795
3	32,0949	60,8082	50	2	6007	6684	8058
4	32,1655	60,7137	39	1,5	6030	6703	8088
5	32,3834	60,4848	30	1,5	5958	6584	7927
6	32,4749	60,2022	9	1,8	6047	6666	7903
7	32,3534	60,1613	7	0,4	6419	6803	7977
8	32,276	60,2409	8	2,9	5963	6609	7896
9	32,1308	60,3266	10	2,5	5901	6550	7895
10	32,0663	60,588	42	2,1	7964	8428	9677
11	31,9161	60,9068	37	2,5	9096	9457	10605
12	31,6106	60,5042	36	2,1	5962	6619	8019
13	31,1371	60,3897	22	2,7	6039	6719	8139
14	31,491	60,3999	24	3	5989	6653	8033
15	31,3067	60,15	6,5	3	5991	6654	8052
16	31,2435	60,0164	6,5	2,5	6068	6717	8113
17	30,9405	60,3602	18	2,2	6023	6702	8144
18	30,7083	60,6034	17	1,7	6092	6787	8244
19	30,7065	60,7618	38	2,3	6070	6760	8238
20	30,6354	60,6873	31	2,1	6158	6837	8290
2017 год							
№	Долгота	Широта	Глубина	Прозрачность	4 канал	3 канал	2 канал
21	30,5556	60,6193	6	1,5	6214	6926	8383
22	31,5341	60,7845	70	1,7	6161	6838	8249
23	31,2909	60,8298	61	2,7	6032	6722	8142
24	31,3466	60,9229	74	2,7	6038	6704	8168
25	31,1503	60,9865	68	2,6	6036	6726	8156
26	31,0548	60,8737	67	2,3	6065	6758	8196
27	30,5848	60,9631	110	2,8	6040	6725	8195
28	31,0163	61,1613	135	2,1	6016	6715	8165
29	30,9531	61,2217	146	2,3	6012	6680	8137
30	31,0918	61,2647	96	2,2	6018	6699	8138
31	30,3117	61,0493	120	2,5	6039	6745	8245

32	30,1972	61,1565	210	2	6769	7458	9056
33	30,5959	61,3907	188	2,5	5997	6703	8174
35	31,3502	61,4097	86	2	6120	6829	8262
36	30,8987	61,5693	190	1,7	6135	6822	8295
37	31,4248	61,3337	103	2	6106	6794	8267
38	31,072	61,5904	89	1,7	6138	6825	8315
39	31,4044	61,5367	32,5	1,6	6212	6941	8471
40	31,4546	61,5724	7,5	1,5	20962	20830	22556
41	31,5119	61,2192	104	2,2	6211	6892	8361
42	31,4855	61,0606	82	2,4	6070	6753	8183
2019 год							
№	Долгота	Широта	Глубина	Прозрачность	4 канал	3 канал	2 канал
1	31,049	61,3932	36	3	6279	7002	8471
2	31,105	61,3689	77	2,6	6244	6985	8457
3	31,1693	61,3755	57	2,8	6279	6991	8471
4	31,2367	61,3881	60	2,5	6295	7020	8498
5	31,2941	61,3946	52	2,7	6271	6999	8478
6	31,3947	61,4201	80	2,4	6276	7015	8468
7	31,4443	61,4362	110	3	6317	7052	8514
8	31,5135	61,4428	29,5	3,9	6314	7043	8484
9	31,5296	61,4414	19	3,3	6424	7161	8592
10	31,4369	61,4737	79	3	6346	7079	8508
11	31,3906	61,4569	130	2,7	6290	7023	8494
12	31,3406	61,4539	77	3	6266	7009	8481
13	31,2718	61,434	108	2,3	6279	7018	8470
14	31,206	61,4225	89	2,3	6266	7002	8472
15	31,1416	61,4054	50	3,9	6270	7001	8464
16	30,9934	61,43	30	2,4	6238	6971	8432
17	31,0329	61,4256	65	3	6246	6988	8463
2019 год							
№	Долгота	Широта	Глубина	Прозрачность	4 канал	3 канал	2 канал
18	31,1239	61,4507	83	3,2	6259	6977	8451
19	31,1839	61,4701	58	2,7	6250	6992	8451
20	31,2397	61,4879	80	2,4	6278	7001	8475
21	31,3749	61,5191	35	3,9	6283	7004	8478
22	31,3096	61,5549	31	2,6	6279	7027	8490
23	31,2535	61,5337	103	2,6	6306	7034	8510
24	31,2067	61,5181	38	2,5	6264	6993	8478
25	31,1402	61,5056	57	2,7	6264	6997	8470
26	31,0699	61,488	75	2,8	6253	6975	8445
27	30,9701	61,4797	130	2,9	6237	6986	8446
28	30,9274	61,4535	37	2,6	6244	6981	8421
29	30,8185	61,4042	170	2,9	6265	7000	8465

30	30,5923	61,3581	45	3	6257	6982	8458
31	30,4239	61,3242	17	2,7	6243	6984	8450
32	30,3507	61,3047	107	3,1	6289	7023	8494
33	30,4068	61,3693	120	3	6295	7027	8490
34	30,389	61,4379	81	2,7	6307	7057	8517
35	30,5063	61,4415	170	2,7	6300	7039	8486
36	30,5215	61,4852	103	3	6308	7057	8525
37	30,5032	61,5035	50	2,6	6306	7066	8515
38	30,6556	61,4842	158	3,1	6272	7010	8504
39	30,6622	61,4905	150	2,9	6256	7010	8479
40	30,6771	61,4964	130	3,2	6255	6974	8471
41	30,7184	61,4927	105	2,9	6246	6987	8468
42	30,7392	61,5014	76	3,1	6259	7001	8484
43	30,7293	61,503	109	2,7	6258	7013	8496
44	30,7073	61,5032	102	3	6262	6999	8488
45	30,7027	61,5109	135	2,9	6256	6996	8484
46	30,6774	61,5367	24	2,6	6296	7043	8504
47	30,7142	61,5356	142	2,7	6269	6998	8476
48	30,7324	61,5281	85	2,8	6248	6996	8478
49	30,7416	61,5318	152	3,4	6261	7004	8460
50	30,7372	61,5456	117	2,7	6285	7037	8507
51	30,7046	61,5611	33	2,4	6365	7105	8527
52	30,7915	61,5202	138	3,2	6263	7002	8476
53	30,8066	61,5219	120	2,6	6253	6997	8482
54	30,8335	61,5208	117	3,3	6260	7005	8462
55	30,8077	61,5307	143	3	6261	7009	8479
56	30,7711	61,5571	120	2,9	6292	7035	8514
57	30,7931	61,5546	120	2,9	6317	7038	8513
2019 год							
№	Долгота	Широта	Глубина	Прозрачность	4 канал	3 канал	2 канал
58	30,8035	61,5493	165	2,9	6290	7031	8508
59	30,8091	61,5574	103	2,9	6326	7068	8519
60	30,8041	61,5905	88	2,6	6319	7071	8521
61	30,8331	61,5665	47	2,6	6289	7039	8511
62	30,8921	61,5228	75	2,8	6266	7023	8485
63	30,9577	61,5056	38	2,7	6272	7005	8482
64	30,8806	61,4978	137	2,7	6261	6983	8474
65	30,8566	61,4881	117	3	6254	6969	8447
66	30,6534	61,4243	181	3,1	6255	6996	8473
67	30,5225	61,389	174	2,7	6269	7001	8486
68	30,5642	61,307	57	2,8	6244	6988	8437
69	30,4399	61,2854	51	3,5	6291	7016	8466
70	30,2703	61,1973	159	3,4	6243	6982	8445

71	30,3964	61,2131	45,7	2,7	6256	6980	8429
72	30,5247	61,2561	114	3,7	6225	6978	8441
73	30,6264	61,2713	47	3,7	6238	6990	8450
74	30,7635	61,3294	133	2,5	6240	6990	8436
75	30,8092	61,3116	160	2,5	6254	6984	8448
76	30,8919	61,334	131	2,5	6254	6976	8436
77	30,824	61,3585	153	2,9	6241	6990	8460
78	30,8816	61,373	17	2,7	6248	6992	8432
79	30,9066	61,4634	20	2,3	6246	6968	8437
80	31,1472	61,3982	39	2,5	6300	7033	8493
81	30,6878	61,6991	5	2,7	6640	7344	8664
82	30,7217	61,6185	35	2,8	6424	7168	8563
83	30,8593	61,5745	130	3,1	6328	7062	8533
84	31,0437	61,5373	51	3,4	6278	7003	8479
85	31,1699	61,5722	59	3,1	6285	7040	8513
86	31,2019	61,6005	50	3,7	6305	7053	8500
87	31,0504	61,6027	50	2,4	6294	7049	8493
88	31,0642	61,6387	60	2,3	6370	7100	8517
89	31,008	61,6665	24	2,1	6391	7107	8506
90	30,9726	61,6064	46	2,4	6381	7132	8551
91	30,8583	61,6148	77	2,7	6339	7090	8528
92	30,7758	61,6017	73	2,5	6322	7092	8525
93	30,6752	61,6449	44	1,9	6543	7251	8603

Таблица 3.4 – Результаты обработки снимков спутника Sentinel-2 за 2017 и 2019 года.

2017 год							
№	Долгота	Широта	Глубина	Прозрачность	2 канал	3 канал	4 канал
1	32,0949	60,8082	50	2	737	446	251
2	32,1655	60,7137	39	1,5	1035	756	644
3	32,1308	60,3265	10	2,5	705	423	249
4	32,0663	60,588	42	2,1	696	417	244
5	31,9161	60,9068	37	2,5	771	462	266
6	31,6106	60,5042	36	2,1	724	419	241
7	31,1371	60,3897	22	2,7	760	458	278
8	31,491	60,3999	24	3	734	438	269
9	31,3067	60,15	6,5	3	743	445	273
10	31,2434	60,0164	6,5	2,5	761	472	283
11	30,9405	60,3602	18	2,2	783	460	278
12	30,7083	60,6034	17	1,7	776	455	274
13	30,7065	60,7618	38	2,3	778	466	276
14	30,6354	60,6873	31	2,1	799	489	313



15	30,5556	60,6193	6	1,5	818	501	305
16	31,5341	60,7845	70	1,7	744	447	264
17	31,2908	60,8298	61	2,7	751	445	270
18	31,3466	60,9228	74	2,7	759	440	263
19	31,1503	60,9865	68	2,6	771	460	267
20	31,0548	60,8737	67	2,3	776	462	270
21	30,5848	60,9631	110	2,8	754	454	259
22	31,0162	61,1613	135	2,1	753	438	260
23	30,9531	61,2217	146	2,3	737	451	260
24	31,0918	61,2647	96	2,2	757	442	255
25	30,3117	61,0493	120	2,5	758	453	258
27	30,1972	61,1565	210	2	805	471	276
28	30,5959	61,3907	188	2,5	763	457	269
29	31,3502	61,4097	86	2	831	497	309
30	30,8987	61,5693	190	1,7	781	461	259
31	31,4248	61,3336	103	2	815	481	281
32	31,072	61,5904	89	1,7	786	478	277
33	31,5119	61,2191	104	2,2	952	617	420
34	31,4855	61,0606	82	2,4	775	456	272
2019 год							
1	31,049	61,3932	36	3	829	532	327
2	31,105	61,3689	77	2,6	815	509	314
3	31,1693	61,3755	57	2,8	823	511	329
4	31,2367	61,3881	60	2,5	829	518	315
5	31,2941	61,3946	52	2,7	814	500	303
6	31,3947	61,4201	80	2,4	827	524	338
7	31,4443	61,4362	110	3	870	543	349
2019 год							
№	Долгота	Широта	Глубина	Прозрачность	2 канал	3 канал	4 канал
8	31,5135	61,4428	29,5	3,9	873	539	353
9	31,5296	61,4414	19	3,3	880	558	354
10	31,4369	61,4737	79	3	865	553	350
11	31,3906	61,4569	130	2,7	868	529	345
12	31,3406	61,4539	77	3	867	545	351
13	31,2718	61,434	108	2,3	817	509	308
14	31,206	61,4225	89	2,3	826	523	332
15	31,1416	61,4054	50	3,9	806	497	319
16	30,9934	61,43	30	2,4	855	527	345
17	31,0329	61,4256	65	3	862	546	356
18	31,1239	61,4507	83	3,2	859	540	338
19	31,1839	61,4701	58	2,7	822	520	319
20	31,2397	61,4879	80	2,4	846	537	350
21	31,3749	61,5191	35	3,9	893	566	358

22	31,3096	61,5549	31	2,6	879	555	364
23	31,2535	61,5337	103	2,6	853	537	336
24	31,2067	61,5181	38	2,5	849	540	346
25	31,1402	61,5056	57	2,7	860	535	329
26	31,0699	61,488	75	2,8	861	539	352
27	30,9701	61,4797	130	2,9	861	552	364
28	30,9274	61,4535	37	2,6	858	542	349
29	30,8185	61,4042	170	2,9	879	562	378
30	30,5923	61,3581	45	3	847	528	332
31	30,4239	61,3242	17	2,7	845	507	326
32	30,3507	61,3047	107	3,1	837	532	346
33	30,4068	61,3693	120	3	832	522	329
34	30,389	61,4379	81	2,7	842	525	327
35	30,5063	61,4415	170	2,7	841	523	340
36	30,5215	61,4852	103	3	851	545	345
37	30,5032	61,5035	50	2,6	852	552	344
38	30,6556	61,4842	158	3,1	873	561	363
39	30,6622	61,4905	150	2,9	864	556	365
40	30,6771	61,4964	130	3,2	872	563	366
41	30,7184	61,4927	105	2,9	859	532	350
42	30,7392	61,5014	76	3,1	845	529	338
43	30,7293	61,503	109	2,7	851	532	337
44	30,7073	61,5032	102	3	857	562	356
45	30,7027	61,5109	135	2,9	843	530	332
46	30,6774	61,5367	24	2,6	856	546	345
47	30,7142	61,5356	142	2,7	858	537	338
2019 год							
№	Долгота	Широта	Глубина	Прозрачность	2 канал	3 канал	4 канал
48	30,7324	61,5281	85	2,8	869	560	342
49	30,7416	61,5318	152	3,4	857	547	339
50	30,7372	61,5456	117	2,7	858	546	352
51	30,7046	61,5611	33	2,4	861	554	352
52	30,7915	61,5202	138	3,2	847	536	346
53	30,8066	61,5219	120	2,6	862	548	352
54	30,8335	61,5208	117	3,3	877	548	364
55	30,8077	61,5307	143	3	852	537	352
56	30,7711	61,5571	120	2,9	855	549	347
57	30,7931	61,5546	120	2,9	858	540	353
58	30,8035	61,5493	165	2,9	844	540	353
59	30,8091	61,5574	103	2,9	840	536	356
60	30,8041	61,5905	88	2,6	824	530	331
61	30,8331	61,5665	47	2,6	872	547	349
62	30,8921	61,5228	75	2,8	852	535	343

63	30,9577	61,5056	38	2,7	864	535	349
64	30,8806	61,4978	137	2,7	879	554	363
65	30,8566	61,4881	117	3	865	543	362
66	30,6534	61,4243	181	3,1	866	557	351
67	30,5225	61,389	174	2,7	829	533	331
68	30,5642	61,307	57	2,8	835	519	335
69	30,4399	61,2854	51	3,5	829	514	330
70	30,2703	61,1973	159	3,4	829	518	324
71	30,3964	61,2131	45,7	2,7	832	520	324
72	30,5247	61,2561	114	3,7	831	518	329
73	30,6264	61,2713	47	3,7	822	509	325
74	30,7635	61,3294	133	2,5	843	529	335
75	30,8092	61,3116	160	2,5	832	534	343
76	30,8919	61,334	131	2,5	838	531	345
77	30,824	61,3585	153	2,9	828	534	341
78	30,8816	61,373	17	2,7	848	538	360
79	30,9066	61,4634	20	2,3	851	531	347
80	31,1472	61,3982	39	2,5	820	515	312
81	30,6878	61,6991	5	2,7	862	589	402
82	30,7217	61,6185	35	2,8	828	539	337
83	30,8593	61,5745	130	3,1	840	529	336
84	31,0437	61,5373	51	3,4	858	544	356
85	31,1699	61,5722	59	3,1	871	563	365
86	31,2019	61,6005	50	3,7	883	570	366
87	31,0504	61,6027	50	2,4	862	552	363
88	31,0642	61,6387	60	2,3	881	564	365
89	31,008	61,6665	24	2,1	884	592	393
90	30,9726	61,6064	46	2,4	863	554	352
91	30,8583	61,6148	77	2,7	845	526	344
92	30,7758	61,6017	73	2,5	826	518	328
93	30,6752	61,6449	44	1,9	832	536	322

### 3.2 Оценка прозрачности по спутниковым снимкам

#### 3.2.1 Обзор научных публикаций по вопросам исследования

Были изучены различные методики для оценки мутности, цветности и других показателей качества воды по спутниковым снимкам с применением натуральных измерений.

Так, в работе [12] по Иваньковскому водохранилищу использовались экспедиционные данные за лето 2015 г, а так же данные по спектральным каналам спутника Landsat 8. В результате была выявлена хорошая корреляционная связь между данными по мутности и цветности воды водохранилища, что дало возможность построить пространственное распределение характеристик на всей акватории, а так же возможность в дальнейшем использовать этот метод для спутникового мониторинга.

В США в рамках программы оценки качества воды озер с 2001; до 2010 г было исследовано 730 из 11 000 внутренних озер штата Мичиган. Снимки Landsat успешно использовались в Миннесоте, Висконсине, Мичигане и других местах для предсказания трофического статуса неисследованных внутренних озер, площадь которых превышает 20 акров, с использованием уравнения регрессии, отражающего связь между натурными измерениями диском Секки и значениями, полученными по снимкам Landsat. Были использованы 14 снимков Landsat за два периода времени (2003-2005 и 2007-2008). Коэффициенты детерминации  $R^2$  восстановленной прозрачности для всех исследованных внутренних озер за указанные периоды были 0,91 и 0,93 соответственно [13].

В Пакистане (для оз.Равал) спутниковые данные Landsat за 2009–2013 гг. использовались для моделирования Secchi Disc Transparency (SDT). Изображения Landsat в пределах  $\pm 3$  дня от измеренных данных SDT позволили разработать регрессионную модель. Результаты этого исследования показывают, что соотношение ETM + канал 3 и канал 1 / канал 3 является надежным предиктором SDT со значениями  $R^2$  0,725 и 0,793 соответственно [14].

В Малайзии были выявлены две основные причины загрязнения рек, а именно освоение земель для промышленности и деятельность в области природных ресурсов, включающая открытие новых сельскохозяйственных угодий и лесозаготовки [15]. Эти мероприятия развивают эрозию почвы, увеличение смеси веществ, мутность и органическое вещество. Сообщается о различных исследованиях полезности дистанционного зондирования в качестве

инструмента мониторинга качества воды. Дистанционное зондирование для мониторинга качества воды в Малайзии было начато в начале 1970-х годов. Была разработана эмпирическая формула для оценки отложений:  $Y=A+BX$  или  $Y=AB^X$ , где  $Y$  - измерение с помощью дистанционного зондирования (т.е. плотность, отражательная способность, энергия), а  $X$  - качество воды (интересующий параметр, т.е. осадок, мутность).  $A$  и  $B$  являются эмпирически производными факторами, значения которых получены на основе статистической зависимости, которая определяется по значению спектрального отражения и между параметрами качества воды. Из спектрального отражения он может дать информацию о полосе или длинах волн подходят для этого параметра качества воды [16]. Это уравнение позже было применено другим исследователем к оценкам параметр качества воды. В будущем, если эмпирическое уравнение будет успешно разработано для каждого качества воды параметр, уравнение может быть использовано для оценки одного и того же параметра качества воды на исследуемом водном объекте [17]. Для исследований был выбран спутник IKONOS. В последствии, например, для окончательного алгоритма прогнозирования концентраций мутности использовался спутник Landsat 7 ETM 3(красная часть электромагнитного спектра) и полоса 4 (ближняя инфракрасная часть электромагнитного спектра).

Еще один пример исследования в Малайзии – это пример исследования, проведенного на острове Пенанг (2001) , с использованием спутниковой сцены от Малазийского Tiungsat-1 для картирования качества воды вокруг острова [18], [19]. Целями исследования были: определить общее количество взвешенных твердых веществ и составить карту качества воды. Однако у спутника Tiungsat-1 для исследуемого района не было однозначных данных по общему взвешенному твердому веществу [20]. Для преодоления этой проблемы они сопоставил изображение Tiungsat-1 с изображениями Landsat TM, которые имеют соответствующие данные по морской воде. Анализ изображения Landsat TM от 20 января 2000года показал наибольшую корреляцию с изображением Tiungsat-1. Данные натурных измерений показывают положительные

корреляции между DN и TSS с R и корневым средним Квадратные (среднеквадратичные) значения составили 0,9256 и 3,6237 мг/л соответственно. Такие характеристики также наблюдали другие исследователи, использующие данные дистанционного зондирования в видимом канале для исследований взвешенных осадков.

### 3.2.2. Обработка данных в Excel

После обработки снимков в программе ArcGis мы получаем таблицы с данными по трем каналам в каждой из точек экспедиций за 2017 и 2019 гг. по двум спутникам. Дальнейшие расчеты проведены для составленного из двух лет ряда каналов. Сформированный ряд разделен на две части, большая часть данных оставлена для составления формул (таблица 3.5, 3.6.), меньшая часть использовалась для проверки полученных формул (таблица 3.7, 3.8).

Таблица 3.5 – Большая часть данных для вывода формул по спутнику Landsat 8.

№	Долгота	Широта	Прозрачность T, м	4 канал	3 канал
1	32,7916	60,5699	1,4	6039	6661
2	32,0949	60,8082	2	6007	6684
3	32,1655	60,7137	1,5	6030	6703
4	32,3834	60,4848	1,5	5958	6584
5	32,4749	60,2022	1,8	6047	6666
6	32,276	60,2409	2,9	5963	6609
7	32,1308	60,3266	2,5	5901	6550
8	32,0663	60,588	2,1	7964	8428
9	31,6106	60,5042	2,1	5962	6619
10	31,1371	60,3897	2,7	6039	6719
11	31,491	60,3999	3	5989	6653
12	31,2435	60,0164	2,5	6068	6717
13	30,9405	60,3602	2,2	6023	6702
14	30,7083	60,6034	1,7	6092	6787
15	30,6354	60,6873	2,1	6158	6837
16	30,5556	60,6193	1,5	6214	6926
17	31,2909	60,8298	2,7	6032	6722
18	31,3466	60,9229	2,7	6038	6704
19	31,1503	60,9865	2,6	6036	6726
20	31,0548	60,8737	2,3	6065	6758
21	31,0163	61,1613	2,1	6016	6715

№	Долгота	Широта	Прозрачность Т, м	4 канал	3 канал
22	30,9531	61,2217	2,3	6012	6680
23	30,3117	61,0493	2,5	6039	6745
24	30,1972	61,1565	2	6769	7458
25	30,5959	61,3907	2,5	5997	6703
26	31,3502	61,4097	2	6120	6829
27	31,4248	61,3337	2	6106	6794
28	31,072	61,5904	1,7	6138	6825
29	31,4546	61,5724	1,5	20962	20830
30	31,5119	61,2192	2,2	6211	6892
31	31,4855	61,0606	2,4	6070	6753
32	31,049	61,3932	3	6279	7002
33	31,1693	61,3755	2,8	6279	6991
34	31,2367	61,3881	2,5	6295	7020
35	31,3947	61,4201	2,4	6276	7015
36	31,4443	61,4362	3	6317	7052
37	31,5135	61,4428	3,9	6314	7043
38	31,4369	61,4737	3	6346	7079
39	31,3906	61,4569	2,7	6290	7023
40	31,3406	61,4539	3	6266	7009
41	31,2718	61,434	2,3	6279	7018
42	31,206	61,4225	2,3	6266	7002
43	31,1416	61,4054	3,9	6270	7001
44	31,0329	61,4256	3	6246	6988
45	31,1239	61,4507	3,2	6259	6977
46	31,1839	61,4701	2,7	6250	6992
47	31,2397	61,4879	2,4	6278	7001
48	31,3749	61,5191	3,9	6283	7004
49	31,3096	61,5549	2,6	6279	7027
50	31,2067	61,5181	2,5	6264	6993
51	31,1402	61,5056	2,7	6264	6997
52	31,0699	61,488	2,8	6253	6975
53	30,9701	61,4797	2,9	6237	6986
54	30,9274	61,4535	2,6	6244	6981
55	30,8185	61,4042	2,9	6265	7000
56	30,5923	61,3581	3	6257	6982
57	30,4239	61,3242	2,7	6243	6984
58	30,3507	61,3047	3,1	6289	7023
59	30,4068	61,3693	3	6295	7027
60	30,389	61,4379	2,7	6307	7057
61	30,5215	61,4852	3	6308	7057
62	30,5032	61,5035	2,6	6306	7066
63	30,6556	61,4842	3,1	6272	7010
64	30,6622	61,4905	2,9	6256	7010

№	Долгота	Широта	Прозрачность Т, м	4 канал	3 канал
65	30,7184	61,4927	2,9	6246	6987
66	30,7392	61,5014	3,1	6259	7001
67	30,7293	61,503	2,7	6258	7013
68	30,7073	61,5032	3	6262	6999
69	30,6774	61,5367	2,6	6296	7043
70	30,7142	61,5356	2,7	6269	6998
71	30,7324	61,5281	2,8	6248	6996
72	30,7416	61,5318	3,4	6261	7004
73	30,7372	61,5456	2,7	6285	7037
74	30,7046	61,5611	2,4	6365	7105
75	30,7915	61,5202	3,2	6263	7002
76	30,8066	61,5219	2,6	6253	6997
77	30,8335	61,5208	3,3	6260	7005
78	30,8077	61,5307	3	6261	7009
79	30,7711	61,5571	2,9	6292	7035
80	30,7931	61,5546	2,9	6317	7038
81	30,8035	61,5493	2,9	6290	7031
82	30,8091	61,5574	2,9	6326	7068
83	30,8331	61,5665	2,6	6289	7039
84	30,8921	61,5228	2,8	6266	7023
85	30,8806	61,4978	2,7	6261	6983
86	30,8566	61,4881	3	6254	6969
87	30,6534	61,4243	3,1	6255	6996
88	30,5225	61,389	2,7	6269	7001
89	30,5642	61,307	2,8	6244	6988
90	30,4399	61,2854	3,5	6291	7016
91	30,2703	61,1973	3,4	6243	6982
92	30,3964	61,2131	2,7	6256	6980
93	30,6264	61,2713	3,7	6238	6990
94	30,7635	61,3294	2,5	6240	6990
95	30,8092	61,3116	2,5	6254	6984
96	30,8919	61,334	2,5	6254	6976
97	30,824	61,3585	2,9	6241	6990
98	30,8816	61,373	2,7	6248	6992
99	31,1472	61,3982	2,5	6300	7033
100	30,6878	61,6991	2,7	6640	7344
101	30,7217	61,6185	2,8	6424	7168
102	30,8593	61,5745	3,1	6328	7062
103	31,0437	61,5373	3,4	6278	7003
104	31,1699	61,5722	3,1	6285	7040
105	31,0504	61,6027	2,4	6294	7049
106	31,0642	61,6387	2,3	6370	7100
107	31,008	61,6665	2,1	6391	7107



№	Долгота	Широта	Прозрачность T, м	4 канал	3 канал
108	30,9726	61,6064	2,4	6381	7132
109	30,8583	61,6148	2,7	6339	7090
110	30,7758	61,6017	2,5	6322	7092

Таблица 3.6 – Большая часть данных для вывода формул по спутнику Sentinel-2.

№	Долгота	Широта	Прозрачность T, м	2 канал	3 канал	4 канал
1	32,0949	60,8082	2	737	446	251
2	32,1655	60,7137	1,5	1035	756	644
3	32,1308	60,3265	2,5	705	423	249
4	32,0663	60,588	2,1	696	417	244
5	31,6106	60,5042	2,1	724	419	241
6	31,1371	60,3897	2,7	760	458	278
7	31,491	60,3999	3	734	438	269
8	31,2434	60,0164	2,5	761	472	283
9	30,9405	60,3602	2,2	783	460	278
10	30,7083	60,6034	1,7	776	455	274
11	30,6354	60,6873	2,1	799	489	313
12	30,5556	60,6193	1,5	818	501	305
13	31,2908	60,8298	2,7	751	445	270
14	31,3466	60,9228	2,7	759	440	263
15	31,1503	60,9865	2,6	771	460	267
16	31,0548	60,8737	2,3	776	462	270
17	31,0162	61,1613	2,1	753	438	260
18	30,9531	61,2217	2,3	737	451	260
19	30,3117	61,0493	2,5	758	453	258
20	30,1972	61,1565	2	805	471	276
21	30,5959	61,3907	2,5	763	457	269
22	31,3502	61,4097	2	831	497	309
23	31,4248	61,3336	2	815	481	281
24	31,072	61,5904	1,7	786	478	277
25	31,5119	61,2191	2,2	952	617	420
26	31,4855	61,0606	2,4	775	456	272
27	31,049	61,3932	3	829	532	327
28	31,1693	61,3755	2,8	823	511	329
29	31,2367	61,3881	2,5	829	518	315
30	31,3947	61,4201	2,4	827	524	338
31	31,4443	61,4362	3	870	543	349
32	31,5135	61,4428	3,9	873	539	353
33	31,4369	61,4737	3	865	553	350

№	Долгота	Широта	Прозрачность Т, м	2 канал	3 канал	4 канал
34	31,3906	61,4569	2,7	868	529	345
35	31,3406	61,4539	3	867	545	351
36	31,2718	61,434	2,3	817	509	308
37	31,206	61,4225	2,3	826	523	332
38	31,1416	61,4054	3,9	806	497	319
39	31,0329	61,4256	3	862	546	356
40	31,1239	61,4507	3,2	859	540	338
41	31,1839	61,4701	2,7	822	520	319
42	31,2397	61,4879	2,4	846	537	350
43	31,3749	61,5191	3,9	893	566	358
44	31,3096	61,5549	2,6	879	555	364
45	31,2067	61,5181	2,5	849	540	346
46	31,1402	61,5056	2,7	860	535	329
47	31,0699	61,488	2,8	861	539	352
48	30,9701	61,4797	2,9	861	552	364
49	30,9274	61,4535	2,6	858	542	349
50	30,8185	61,4042	2,9	879	562	378
51	30,5923	61,3581	3	847	528	332
52	30,4239	61,3242	2,7	845	507	326
53	30,3507	61,3047	3,1	837	532	346
54	30,4068	61,3693	3	832	522	329
55	30,389	61,4379	2,7	842	525	327
56	30,5215	61,4852	3	851	545	345
57	30,5032	61,5035	2,6	852	552	344
58	30,6556	61,4842	3,1	873	561	363
59	30,6622	61,4905	2,9	864	556	365
60	30,7184	61,4927	2,9	859	532	350
61	30,7392	61,5014	3,1	845	529	338
62	30,7293	61,503	2,7	851	532	337
63	30,7073	61,5032	3	857	562	356
64	30,6774	61,5367	2,6	856	546	345
65	30,7142	61,5356	2,7	858	537	338
66	30,7324	61,5281	2,8	869	560	342
67	30,7416	61,5318	3,4	857	547	339
68	30,7372	61,5456	2,7	858	546	352
69	30,7046	61,5611	2,4	861	554	352
70	30,7915	61,5202	3,2	847	536	346
71	30,8066	61,5219	2,6	862	548	352
72	30,8335	61,5208	3,3	877	548	364
73	30,8077	61,5307	3	852	537	352
74	30,7711	61,5571	2,9	855	549	347
75	30,7931	61,5546	2,9	858	540	353

№	Долгота	Широта	Прозрачность Т, м	2 канал	3 канал	4 канал
76	30,8035	61,5493	2,9	844	540	353
77	30,8091	61,5574	2,9	840	536	356
78	30,8331	61,5665	2,6	872	547	349
79	30,8921	61,5228	2,8	852	535	343
80	30,8806	61,4978	2,7	879	554	363
81	30,8566	61,4881	3	865	543	362
82	30,6534	61,4243	3,1	866	557	351
83	30,5225	61,389	2,7	829	533	331
84	30,5642	61,307	2,8	835	519	335
85	30,4399	61,2854	3,5	829	514	330
86	30,2703	61,1973	3,4	829	518	324
87	30,3964	61,2131	2,7	832	520	324
88	30,6264	61,2713	3,7	822	509	325
89	30,7635	61,3294	2,5	843	529	335
90	30,8092	61,3116	2,5	832	534	343
91	30,8919	61,334	2,5	838	531	345
92	30,824	61,3585	2,9	828	534	341
93	30,8816	61,373	2,7	848	538	360
94	31,1472	61,3982	2,5	820	515	312
95	30,6878	61,6991	2,7	862	589	402
96	30,7217	61,6185	2,8	828	539	337
97	30,8593	61,5745	3,1	840	529	336
98	31,0437	61,5373	3,4	858	544	356
99	31,1699	61,5722	3,1	871	563	365
100	31,0504	61,6027	2,4	862	552	363
101	31,0642	61,6387	2,3	881	564	365
102	31,008	61,6665	2,1	884	592	393
103	30,9726	61,6064	2,4	863	554	352
104	30,8583	61,6148	2,7	845	526	344
105	30,7758	61,6017	2,5	826	518	328

Таблица 3.7 – Меньшая часть данных для проверки формул по спутнику Landsat 8.

№	Долгота	Широта	Прозрачность Т, м	4 канал	3 канал
1	32,57093	60,71497	1,8	11558	11601
2	32,3534	60,16128	0,4	6419	6803
3	31,91608	60,90675	2,5	9096	9457
4	31,30668	60,15003	3	5991	6654
5	30,7065	60,7618	2,3	6070	6760
6	31,53405	60,78448	1,7	6161	6838

№	Долгота	Широта	Прозрачность Т, м	4 канал	3 канал
7	30,5848	60,96313	2,8	6040	6725
8	31,0918	61,26465	2,2	6018	6699
9	30,89867	61,56928	1,7	6135	6822
10	31,4044	61,53668	1,6	6212	6941
11	31,10505	61,36886	2,6	6244	6985
12	31,29411	61,39463	2,7	6271	6999
13	31,5296	61,44138	3,3	6424	7161
14	30,99338	61,42999	2,4	6238	6971
15	31,25351	61,53372	2,6	6306	7034
16	30,50627	61,44155	2,7	6300	7039
17	30,67708	61,49644	3,2	6255	6974
18	30,70267	61,51086	2,9	6256	6996
19	30,80411	61,59049	2,6	6319	7071
20	30,95771	61,50561	2,7	6272	7005
21	30,52467	61,25607	3,7	6225	6978
22	30,9066	61,46336	2,3	6246	6968
23	31,20189	61,60054	3,7	6305	7053
24	30,67523	61,64487	1,9	6543	7251

Таблица 3.8 – Меньшая часть данных для проверки формул по спутнику Sentinel-2.

№	Долгота	Широта	Прозрачность Т, м	2 канал	3 канал	4 канал
1	31,9161	60,9068	2,5	771	462	266
2	31,3067	60,15	3	743	445	273
3	30,7065	60,7618	2,3	778	466	276
4	31,5341	60,7845	1,7	744	447	264
5	30,5848	60,9631	2,8	754	454	259
6	31,0918	61,2647	2,2	757	442	255
7	30,8987	61,5693	1,7	781	461	259
8	31,105	61,3689	2,6	815	509	314
9	31,2941	61,3946	2,7	814	500	303
10	31,5296	61,4414	3,3	880	558	354
11	30,9934	61,43	2,4	855	527	345
12	31,2535	61,5337	2,6	853	537	336
13	30,5063	61,4415	2,7	841	523	340
14	30,6771	61,4964	3,2	872	563	366
15	30,7027	61,5109	2,9	843	530	332
16	30,8041	61,5905	2,6	824	530	331
17	30,9577	61,5056	2,7	864	535	349
18	30,5247	61,2561	3,7	831	518	329
19	30,9066	61,4634	2,3	851	531	347

№	Долгота	Широта	Прозрачность T, м	2 канал	3 канал	4 канал
20	31,2019	61,6005	3,7	883	570	366
21	30,6752	61,6449	1,9	832	536	322

Первый этап работы с полученными данными – подбор комбинации каналов, при котором коэффициент множественной корреляции будет наибольшим и будет стремиться к 0,7. В качестве зависимых переменных использовались каналы и их комбинации, независимой переменной выступал логарифм прозрачности ( $\ln T$ ; T – transparency – прозрачность). Использование натурального логарифма прозрачности по диску Секки ( $\ln T$ ) дало возможность увеличить диапазон обрабатываемых значений. При подборе использовали комбинации каналов, предложенные в различных исследованиях [10], [11], [12]. Для каждой комбинации, с помощью пакета анализа данных в Microsoft Office Excel, был рассчитан коэффициент множественной корреляции. В сводных таблицах 3.9 и 3.10 приведена информация об используемых комбинациях каналов, коэффициентах множественной корреляции по спутникам Landsat 8 и Sentinel-2 соответственно, а также P-значения, полученные из регрессионной статистики в Microsoft Office Excel. Величина P-значения – вероятность, позволяющая определить значимость коэффициента регрессии.

Таблица 3.9 – Сводная таблица комбинаций каналов и коэффициентов множественной корреляции, спутник Landsat 8.

№	Комбинации каналов	Коэффициент множественной корреляции	Диапазон P-значений
1	4;3;4/3;3/4	0,6	0,000095-0,14
2	4;3;4/3	0,53	0,0002-0,42
3	4;3	0,58	$3,35 \cdot e^{-10}$ - $5,19 \cdot e^{-10}$
5	2;3;4;4/3;3/4	0,6	0,0001-0,64
6	4/3;3/4	0,5	0,0005-0,0007
7	4/3;3/4;2/3;2/4	0,54	0,03-0,06

8	3/4;2/3;2/4	0,52	0,005-0,1
9	4	0,24	0,01
10	3	0,22	0,01
11	4;3;4/3;3/4;2;2/3;2/4	0,62	0,01-0,78

Таблица 3.10 – Сводная таблица комбинаций каналов и коэффициентов множественной корреляции, спутник Sentinel-2.

№	Комбинации каналов	Коэффициент множественной корреляции	Диапазон Р-значений
1	2;3;4;4/3;3/4	0,59	0,2-0,82
2	4/3;3/4	0,58	$2,4 \cdot e^{-10}$ - $1,27 \cdot e^{-9}$
3	3;4;4/3;3/4	0,58	0,27-0,89
4	3;4;4/3	0,58	$1,8 \cdot e^{-10}$ - $5,8 \cdot e^{-9}$
5	2;3;4;4/3;2/4;3/4;2/3	0,61	0,05-0,63
6	2/4	0,24	0,01
7	3	0,17	0,07
8	4	0,1	0,26
9	3/4;2/3;2/4	0,6	$1,1 \cdot e^{-10}$ - $3,2 \cdot e^{-10}$

Для спутника Landsat 8 был выбран третий набор комбинаций каналов (таблица 3.9.), для спутника Sentinel-2 – девятый (таблица 3.10.). Не смотря на то, что выбранные наборы не обладают максимальной множественной корреляцией из представленных наборов, величина Р-значения представленных в нем комбинаций не превышает 0,05.

Второй этап – составление формул для восстановления прозрачности воды с помощью подобранных коэффициентов и выявление погрешностей полученных результатов. В результате для каждого выбранного набора составлена формула, а так же рассчитаны абсолютные и относительные погрешности (таблица 3.13.) восстановления. Восстановленные по формулам

значения прозрачности воды в каждой точке для двух спутников представлены в таблицах 3.11 и 3.12.

Таблица 3.11 – Восстановленные по формуле значения прозрачности по спутнику Landsat 8.

№	Прозрачность Т, м	4 канал	3 канал	Восстановленное LnT	Восстановленная прозрачность Т, м
1	1,4	6039	6661	0,67981	1,97351
2	2	6007	6684	0,8232	2,27778
3	1,5	6030	6703	0,81522	2,25968
4	1,5	5958	6584	0,68091	1,97568
5	1,8	6047	6666	0,67273	1,95958
6	2,9	5963	6609	0,73503	2,08554
7	2,5	5901	6550	0,7357	2,08695
8	2,1	7964	8428	0,48524	1,62456
9	2,1	5962	6619	0,76434	2,14759
10	2,7	6039	6719	0,83502	2,30487
11	3	5989	6653	0,78628	2,19521
12	2,5	6068	6717	0,7555	2,12868
13	2,2	6023	6702	0,83045	2,29435
14	1,7	6092	6787	0,88145	2,4144
15	2,1	6158	6837	0,84646	2,33137
16	1,5	6214	6926	0,94141	2,56359
17	2,7	6032	6722	0,86095	2,36542
18	2,7	6038	6704	0,79744	2,21985
19	2,6	6036	6726	0,86143	2,36654
20	2,3	6065	6758	0,8729	2,39383
21	2,1	6016	6715	0,88314	2,41849
22	2,3	6012	6680	0,79971	2,22489
23	2,5	6039	6745	0,9046	2,47095
24	2	6769	7458	0,94566	2,57452
25	2,5	5997	6703	0,89962	2,45867
26	2	6120	6829	0,92223	2,5149
27	2	6106	6794	0,86438	2,37353
28	1,7	6138	6825	0,86549	2,37618
29	1,5	20962	20830	0,43145	1,53949
30	2,2	6211	6892	0,85809	2,35866
31	2,4	6070	6753	0,84673	2,332
32	3	6279	7002	0,97855	2,6606
33	2,8	6279	6991	0,94911	2,58342
34	2,5	6295	7020	0,9858	2,67996

№	Прозрачность Т, м	4 канал	3 канал	Восстановленное LnT	Восстановленная прозрачность Т, м
35	2,4	6276	7015	1,02101	2,776
36	3	6317	7052	1,01517	2,75983
37	3,9	6314	7043	0,99876	2,71491
38	3	6346	7079	1,01326	2,75456
39	2,7	6290	7023	1,00662	2,73633
40	3	6266	7009	1,03053	2,80255
41	2,3	6279	7018	1,02137	2,77699
42	2,3	6266	7002	1,0118	2,75054
43	3,9	6270	7001	0,99889	2,71527
44	3	6246	6988	1,02548	2,78844
45	3,2	6259	6977	0,9628	2,61902
46	2,7	6250	6992	1,02596	2,78977
47	2,4	6278	7001	0,97843	2,66028
48	3,9	6283	7004	0,97367	2,64765
49	2,6	6279	7027	1,04545	2,84469
50	2,5	6264	6993	0,99283	2,69886
51	2,7	6264	6997	1,00353	2,7279
52	2,8	6253	6975	0,97279	2,64532
53	2,9	6237	6986	1,04315	2,83814
54	2,6	6244	6981	1,01187	2,75073
55	2,9	6265	7000	1,009	2,74287
56	3	6257	6982	0,98129	2,66791
57	2,7	6243	6984	1,02245	2,78
58	3,1	6289	7023	1,00917	2,74333
59	3	6295	7027	1,00453	2,73063
60	2,7	6307	7057	1,05413	2,86946
61	3	6308	7057	1,05157	2,86213
62	2,6	6306	7066	1,08077	2,94694
63	3,1	6272	7010	1,01786	2,76727
64	2,9	6256	7010	1,05878	2,88286
65	2,9	6246	6987	1,02281	2,78099
66	3,1	6259	7001	1,02703	2,79275
67	2,7	6258	7013	1,0617	2,89127
68	3	6262	6999	1,014	2,75661
69	2,6	6296	7043	1,04479	2,84281
70	2,7	6269	6998	0,99342	2,70046
71	2,8	6248	6996	1,04178	2,83425
72	3,4	6261	7004	1,02994	2,80089
73	2,7	6285	7037	1,05687	2,87735
74	2,4	6365	7105	1,03424	2,81297



№	Прозрачность Т, м	4 канал	3 канал	Восстановленное LnT	Восстановленная прозрачность Т, м
75	3,2	6263	7002	1,01947	2,77173
76	2,6	6253	6997	1,03167	2,80574
77	3,3	6260	7005	1,03517	2,81559
78	3	6261	7009	1,04332	2,83862
79	2,9	6292	7035	1,03361	2,81121
80	2,9	6317	7038	0,9777	2,65835
81	2,9	6290	7031	1,02802	2,79554
82	2,9	6326	7068	1,03497	2,81502
83	2,6	6289	7039	1,05199	2,86335
84	2,8	6266	7023	1,068	2,90954
85	2,7	6261	6983	0,97374	2,64783
86	3	6254	6969	0,95418	2,59654
87	3,1	6255	6996	1,02387	2,78396
88	2,7	6269	7001	1,00145	2,72223
89	2,8	6244	6988	1,0306	2,80274
90	3,5	6291	7016	0,98533	2,67869
91	3,4	6243	6982	1,0171	2,76516
92	2,7	6256	6980	0,9785	2,66046
93	3,7	6238	6990	1,0513	2,86136
94	2,5	6240	6990	1,04618	2,84676
95	2,5	6254	6984	0,99432	2,70288
96	2,5	6254	6976	0,97291	2,64563
97	2,9	6241	6990	1,04362	2,83949
98	2,7	6248	6992	1,03107	2,80407
99	2,5	6300	7033	1,0078	2,73957
100	2,7	6640	7344	0,97051	2,63929
101	2,8	6424	7168	1,05194	2,8632
102	3,1	6328	7062	1,0138	2,75605
103	3,4	6278	7003	0,98378	2,67456
104	3,1	6285	7040	1,0649	2,90054
105	2,4	6294	7049	1,06596	2,90364
106	2,3	6370	7100	1,00807	2,74032
107	2,1	6391	7107	0,9731	2,64613
108	2,4	6381	7132	1,06558	2,90251
109	2,7	6339	7090	1,0606	2,88809
110	2,5	6322	7092	1,10943	3,03261

Таблица 3.12 – Восстановленные по формуле значения прозрачности по спутнику Sentinel-2.

№	Прозрач ность Т, м	Комбинац ия 3/4	Комбинац ия 2/3	Комбинац ия 2/4	Восстановлен ное LnT	Восстановлен ная прозрачность Т, м
1	2	1,77689	1,65247	2,93625	0,744	2,104
2	1,5	1,17391	1,36905	1,60714	0,369	1,447
3	2,5	1,6988	1,66667	2,83133	0,833	2,300
4	2,1	1,70902	1,66906	2,85246	0,814	2,257
5	2,1	1,73859	1,72792	3,00415	0,669	1,952
6	2,7	1,64748	1,65939	2,73381	0,916	2,499
7	3	1,62825	1,6758	2,72862	0,935	2,547
8	2,5	1,66784	1,61229	2,68905	0,931	2,538
9	2,2	1,65468	1,70217	2,81655	0,871	2,389
10	1,7	1,66058	1,70549	2,83212	0,857	2,356
11	2,1	1,5623	1,63395	2,55272	1,035	2,815
12	1,5	1,64262	1,63273	2,68197	0,941	2,563
13	2,7	1,64815	1,68764	2,78148	0,894	2,445
14	2,7	1,673	1,725	2,88593	0,813	2,256
15	2,6	1,72285	1,67609	2,88764	0,782	2,186
16	2,3	1,71111	1,67965	2,87407	0,796	2,216
17	2,1	1,68462	1,71918	2,89615	0,795	2,215
18	2,3	1,73462	1,63415	2,83462	0,832	2,298
19	2,5	1,75581	1,67329	2,93798	0,734	2,083
20	2	1,70652	1,70913	2,91667	0,764	2,146
21	2,5	1,69888	1,66958	2,83643	0,829	2,291
22	2	1,60841	1,67203	2,68932	0,968	2,633
23	2	1,71174	1,69439	2,90036	0,774	2,169
24	1,7	1,72563	1,64435	2,83755	0,827	2,286
25	2,2	1,46905	1,54295	2,26667	1,041	2,832
26	2,4	1,67647	1,69956	2,84926	0,832	2,299
27	3	1,62691	1,55827	2,53517	0,998	2,714
28	2,8	1,55319	1,61057	2,50152	1,040	2,828
29	2,5	1,64444	1,60039	2,63175	0,962	2,617
30	2,4	1,5503	1,57824	2,44675	1,033	2,810
31	3	1,55587	1,60221	2,49284	1,035	2,816
32	3,9	1,52691	1,61967	2,47309	1,069	2,912
33	3	1,58	1,5642	2,47143	1,016	2,762
34	2,7	1,53333	1,64083	2,51594	1,072	2,921
35	3	1,55271	1,59083	2,47009	1,035	2,815
36	2,3	1,6526	1,60511	2,6526	0,952	2,590
37	2,3	1,5753	1,57935	2,48795	1,018	2,769
38	3,9	1,55799	1,62173	2,52665	1,037	2,822
39	3	1,53371	1,57875	2,42135	1,043	2,838

№	Прозрач ность Т, м	Комбинац ия 3/4	Комбинац ия 2/3	Комбинац ия 2/4	Восстановлен ное LnT	Восстановлен ная прозрачность Т, м
40	3,2	1,59763	1,59074	2,54142	1,003	2,725
41	2,7	1,63009	1,58077	2,5768	0,985	2,677
42	2,4	1,53429	1,57542	2,41714	1,041	2,833
43	3,9	1,58101	1,57774	2,49441	1,015	2,759
44	2,6	1,52473	1,58378	2,41484	1,051	2,861
45	2,5	1,56069	1,57222	2,45376	1,026	2,790
46	2,7	1,62614	1,60748	2,61398	0,973	2,647
47	2,8	1,53125	1,5974	2,44602	1,054	2,868
48	2,9	1,51648	1,55978	2,36538	1,041	2,833
49	2,6	1,55301	1,58303	2,45845	1,033	2,809
50	2,9	1,48677	1,56406	2,3254	1,057	2,878
51	3	1,59036	1,60417	2,5512	1,006	2,734
52	2,7	1,55521	1,66667	2,59202	1,051	2,860
53	3,1	1,53757	1,57331	2,41908	1,039	2,825
54	3	1,58663	1,59387	2,52888	1,010	2,746
55	2,7	1,6055	1,60381	2,57492	0,993	2,699
56	3	1,57971	1,56147	2,46667	1,016	2,763
57	2,6	1,60465	1,54348	2,47674	1,011	2,748
58	3,1	1,54545	1,55615	2,40496	1,029	2,797
59	2,9	1,52329	1,55396	2,36712	1,035	2,816
60	2,9	1,52	1,61466	2,45429	1,073	2,924
61	3,1	1,56509	1,59735	2,5	1,027	2,792
62	2,7	1,57864	1,59962	2,52522	1,016	2,762
63	3	1,57865	1,52491	2,4073	1,017	2,765
64	2,6	1,58261	1,56777	2,48116	1,015	2,758
65	2,7	1,58876	1,59777	2,53846	1,008	2,740
66	2,8	1,63743	1,55179	2,54094	0,998	2,714
67	3,4	1,61357	1,56673	2,52802	1,000	2,719
68	2,7	1,55114	1,57143	2,4375	1,031	2,803
69	2,4	1,57386	1,55415	2,44602	1,018	2,769
70	3,2	1,54913	1,58022	2,44798	1,034	2,813
71	2,6	1,55682	1,57299	2,44886	1,028	2,796
72	3,3	1,50549	1,60036	2,40934	1,076	2,934
73	3	1,52557	1,58659	2,42045	1,052	2,864
74	2,9	1,58213	1,55738	2,46398	1,015	2,760
75	2,9	1,52975	1,58889	2,43059	1,051	2,859
76	2,9	1,52975	1,56296	2,39093	1,038	2,822
77	2,9	1,50562	1,56716	2,35955	1,051	2,861
78	2,6	1,56734	1,59415	2,49857	1,025	2,786

№	Прозрач ность T, м	Комбинац ия 3/4	Комбинац ия 2/3	Комбинац ия 2/4	Восстановлен ное LnT	Восстановлен ная прозрачность T, м
79	2,8	1,55977	1,59252	2,48397	1,030	2,802
80	2,7	1,52617	1,58664	2,42149	1,052	2,863
81	3	1,5	1,593	2,3895	1,075	2,929
82	3,1	1,58689	1,55476	2,46724	1,014	2,756
83	2,7	1,61027	1,55535	2,50453	1,006	2,734
84	2,8	1,54925	1,60886	2,49254	1,043	2,837
85	3,5	1,55758	1,61284	2,51212	1,036	2,818
86	3,4	1,59877	1,60039	2,55864	1,000	2,717
87	2,7	1,60494	1,6	2,5679	0,995	2,704
88	3,7	1,56615	1,61493	2,52923	1,028	2,796
89	2,5	1,5791	1,59357	2,51642	1,016	2,762
90	2,5	1,55685	1,55805	2,42566	1,025	2,787
91	2,5	1,53913	1,57815	2,42899	1,040	2,828
92	2,9	1,56598	1,55056	2,42815	1,021	2,775
93	2,7	1,49444	1,57621	2,35556	1,064	2,899
94	2,5	1,65064	1,59223	2,62821	0,963	2,620
95	2,7	1,46517	1,4635	2,14428	0,948	2,581
96	2,8	1,59941	1,53618	2,45697	1,014	2,756
97	3,1	1,5744	1,5879	2,5	1,019	2,771
98	3,4	1,52809	1,57721	2,41011	1,046	2,845
99	3,1	1,54247	1,54707	2,3863	1,026	2,791
100	2,4	1,52066	1,56159	2,37466	1,041	2,831
101	2,3	1,54521	1,56206	2,4137	1,031	2,803
102	2,1	1,50636	1,49324	2,24936	0,996	2,707
103	2,4	1,57386	1,55776	2,4517	1,018	2,769
104	2,7	1,52907	1,60646	2,4564	1,060	2,886
105	2,5	1,57927	1,59459	2,51829	1,016	2,761

Таблица 3.13 – Формулы для восстановления прозрачности по спутникам Landsat 8 и Sentinel-2.

Спутник	Формула	Погрешность относительная, %			Погрешность абсолютная, м
		средняя	макс	мин	средняя
Land sat 8	$\text{LnT} = (-1,7 + (-0,00256 * (4\text{к}) + (0,0026 * (3\text{к})))$	12,59	70,9	0,01	0,31
Sentinel-2	$\text{LnT} = (-24,17 + (15,97 * (3\text{к}/4\text{к})) + (16,55 * (2\text{к}/3\text{к})) + (-10,49 * (2\text{к}/4\text{к})))$	10,6	70,8	0,02	0,27

Для перехода к метрической системе измерения прозрачности воды было применено экспоненцирование:

$$T = e^{(\text{LnT})} \quad (1)$$

Последним этапом расчетов является проверка полученных формул на данных, которые случайным образом заранее выбраны из общего ряда. Восстановленные по формулам значения прозрачности воды для двух спутников представлены в таблицах 3.14 и 3.15.

Таблица 3.14 – Восстановленные по данным для проверки значения прозрачности по спутнику Landsat 8.

№	Прозрачность Т, м	4 канал	3 канал	Восстановленное LnT	Восстановленная прозрачность Т, м
1	1,8	11558	11601	-0,215	0,806
2	0,4	6419	6803	0,088	1,092
3	2,5	9096	9457	0,344	1,410
4	3	5991	6654	0,784	2,190
5	2,3	6070	6760	0,865	2,376
6	1,7	6161	6838	0,841	2,320
7	2,8	6040	6725	0,849	2,336
8	2,2	6018	6699	0,835	2,305
9	1,7	6135	6822	0,865	2,375
10	1,6	6212	6941	0,987	2,682
11	2,6	6244	6985	1,023	2,780

№	Прозрачность Т, м	4 канал	3 канал	Восстановленное LnT	Восстановленная прозрачность Т, м
12	2,7	6271	6999	0,991	2,694
13	3,3	6424	7161	1,033	2,810
14	2,4	6238	6971	1,000	2,720
15	2,6	6306	7034	0,995	2,705
16	2,7	6300	7039	1,024	2,784
17	3,2	6255	6974	0,965	2,625
18	2,9	6256	6996	1,021	2,777
19	2,6	6319	7071	1,061	2,889
20	2,7	6272	7005	1,004	2,730
21	3,7	6225	6978	1,052	2,865
22	2,3	6246	6968	0,972	2,643
23	3,7	6305	7053	1,049	2,853
24	1,9	6543	7251	0,970	2,637

Таблица 3.15 – Восстановленные по данным для проверки значения прозрачности по спутнику Sentinel-2.

№	Прозрачн ость Т, м	Комбинация 2/3	Комбинаци я 3/4	Комбинация2/4	Восстановле нное LnT	Восстановл енная прозрачнос ть Т, м
1	2,5	1,66883	1,73684	2,8985	0,771	2,163
2	3	1,66966	1,63004	2,72161	0,936	2,549
3	2,3	1,66953	1,68841	2,81884	0,845	2,329
4	1,7	1,66443	1,69318	2,81818	0,844	2,326
5	2,8	1,66079	1,7529	2,9112	0,762	2,142
6	2,2	1,71267	1,73333	2,96863	0,705	2,024
7	1,7	1,69414	1,77992	3,01544	0,651	1,918
8	2,6	1,60118	1,62102	2,59554	0,981	2,667
9	2,7	1,628	1,65017	2,68647	0,936	2,550
10	3,3	1,57706	1,57627	2,48588	1,018	2,767
11	2,4	1,62239	1,52754	2,47826	1,070	2,914
12	2,6	1,58845	1,59821	2,53869	1,003	2,725
13	2,7	1,60803	1,53824	2,47353	1,052	2,865
14	3,2	1,54885	1,53825	2,38251	1,028	2,796
15	2,9	1,59057	1,59639	2,53916	1,003	2,728
16	2,6	1,55472	1,60121	2,48943	1,009	2,743
17	2,7	1,61495	1,53295	2,47564	1,060	2,888
18	3,7	1,60425	1,57447	2,52584	1,020	2,772

№	Прозрачность T, м	Комбинация 2/3	Комбинация 3/4	Комбинация 2/4	Восстановленное LnT	Восстановленная прозрачность T, м
19	2,3	1,60264	1,53026	2,45245	1,057	2,878
20	3,7	1,54912	1,55738	2,41257	1,023	2,781
21	1,9	1,55224	1,6646	2,58385	0,989	2,690

Погрешности восстановления, полученные при проверке формул на независимом материале, представлены в таблицах 3.16 и 3.17.

Таблица 3.16 – Оценка относительной погрешности восстановления прозрачности по контрольным данным.

Спутник	Погрешность относительная с наиб.членом, %			Погрешность относительная без наиб.члена, %		
	средняя	макс	мин	средняя	макс	мин
Landsat 8	26	172	0,22	20	67	0,22
Sentinel-2	-	-	-	15	41,5	1,24

Таблица 3.17 – Оценка абсолютной погрешности восстановления прозрачности по контрольным данным.

Спутник	Абсолютная погрешность, м		
	средняя	максимальная	минимальная
Landsat 8	0,47	1,08	0,006
Sentinel-2	0,38	0,92	0,02

На рисунке 3.6. представлена гистограмма, отображающая натурные и восстановленные значения прозрачности Ладожского озера в отдельных точках

по двум спутникам. Гистограмма построена по данным, полученным на станциях, расположенных на различных глубинах.

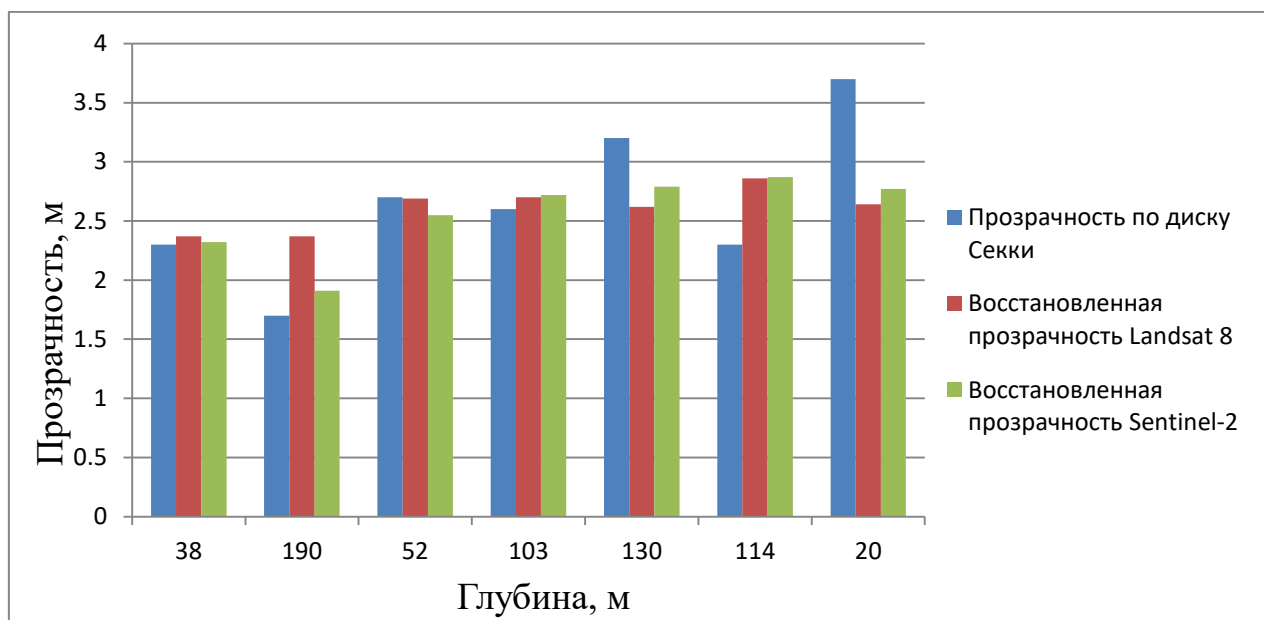


Рисунок 3.6 – Натурные и восстановленные значения прозрачности.

### 3.3. Анализ результатов

После того, как по формулам (таблица 3.11.), (1) были восстановлены значения прозрачности, важно было оценить относительные ошибки полученных результатов. На рисунке 3.7. представлена зависимость относительных ошибок от прозрачности по спутнику Landsat 8.



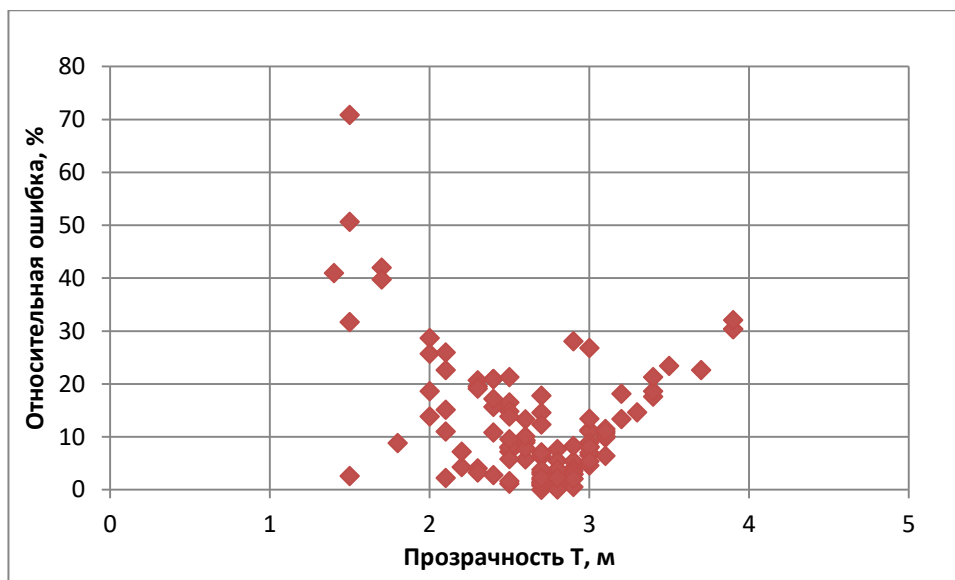


Рисунок 3.7 – Зависимость относительных ошибок от прозрачности воды по спутнику Landsat 8.

Анализируя зависимость относительных ошибок от прозрачности воды спутника Landsat 8 (рисунок 3.7.), можно заметить, что большинство ошибок находится в интервале от 0 до 10 % при прозрачности от 2 до 3 метров. Наибольшие ошибки восстановления по данному спутнику (более 40%) наблюдаются для значений прозрачности 1,5 м.

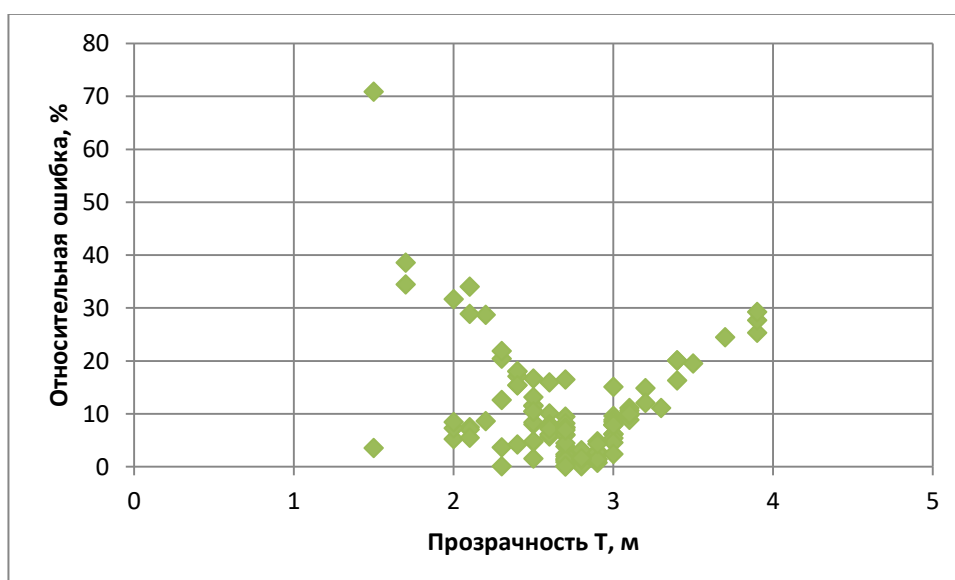


Рисунок 3.8 – Зависимости относительных ошибок от прозрачности воды (Т) по спутнику Sentinel-2.

Аналогично выглядит распределение ошибок восстановления по снимкам спутника Sentinel-2: наибольшая концентрация точек наблюдается в области от 0 до 10 % и диапазоне прозрачности от 2 до 3 метров (рисунок 3.8.).

Важнейшей оценкой качества проделанной работы служит оценка погрешностей восстановления значений прозрачности на независимом материале. Для этого были проанализированы как относительные, так и абсолютные погрешности.

Чтобы оценить относительные погрешности восстановления прозрачности воды, все полученные погрешности были разделены на интервалы. Число попаданий в заданные интервалы можно увидеть на рисунках 3.9. и 3.10. для спутников Landsat 8 и Sentinel-2 соответственно.

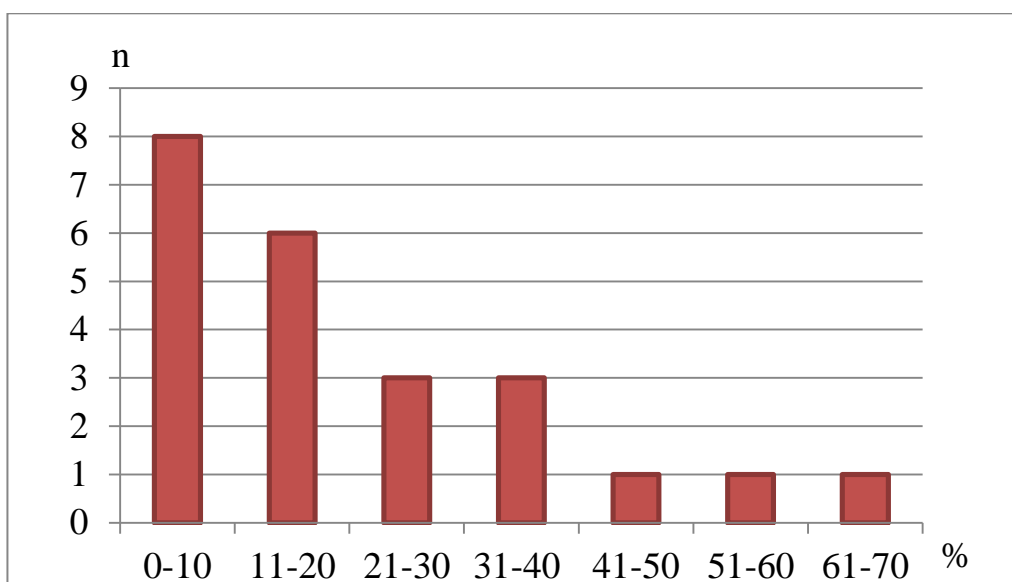


Рисунок 3.9 – Распределение относительных ошибок восстановления прозрачности по спутнику Landsat 8.

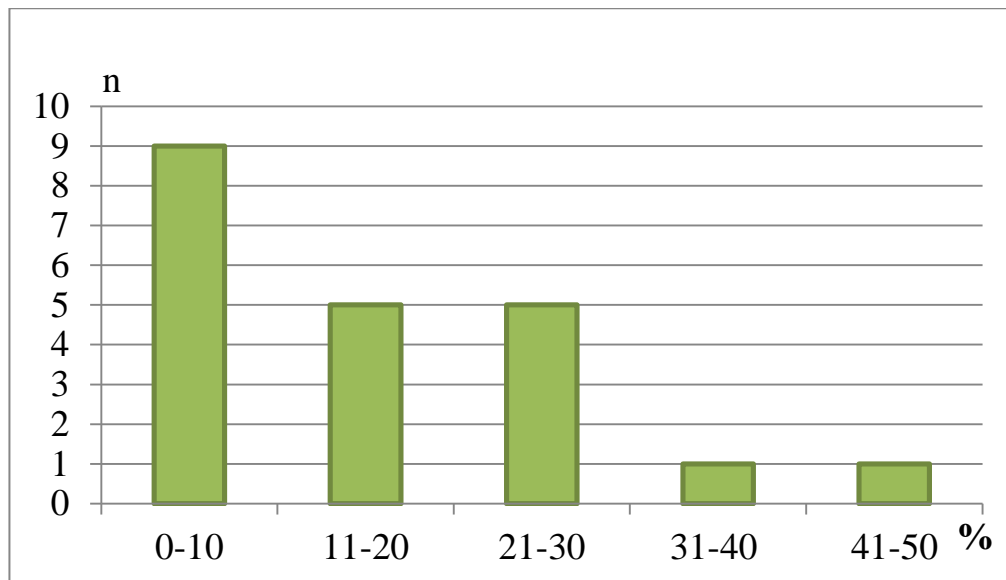


Рисунок 3.10 – Распределение относительных ошибок восстановления прозрачности по спутнику Sentinel-2.

Видно, что наибольшее число попаданий находится в интервале от 0 до 10 %, а так же, что по спутнику Landsat 8 присутствуют ошибки, на порядок выше, чем по Sentinel-2 (более 50%).

Помимо оценки относительных ошибок, нужно оценить абсолютные погрешности с учетом знака. Знак в данном случае покажет либо завышение восстановленных значений «-», либо их занижение «+».

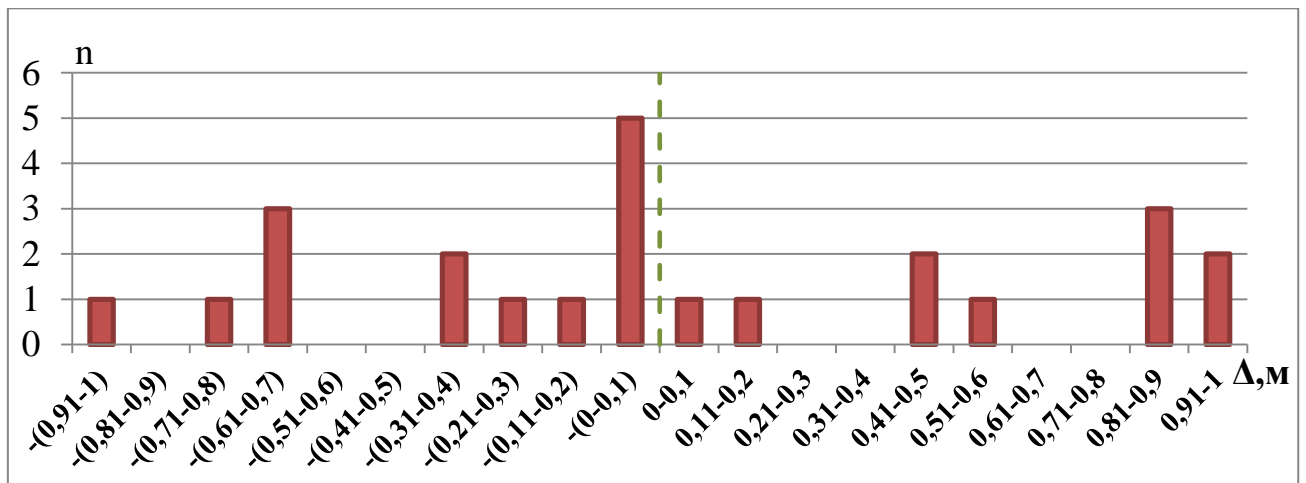


Рисунок 3.11 – Распределения абсолютных ошибок восстановления прозрачности по спутнику Landsat 8.

На рисунке 3.11. представлена гистограмма распределения отклонений абсолютных погрешностей прозрачности. Общее количество завышений восстановленных значений над измеренными – 14, а занижений 10. Наибольшее количество завышений в интервале от 0 до 0,1 м и составляет 5 случаев.

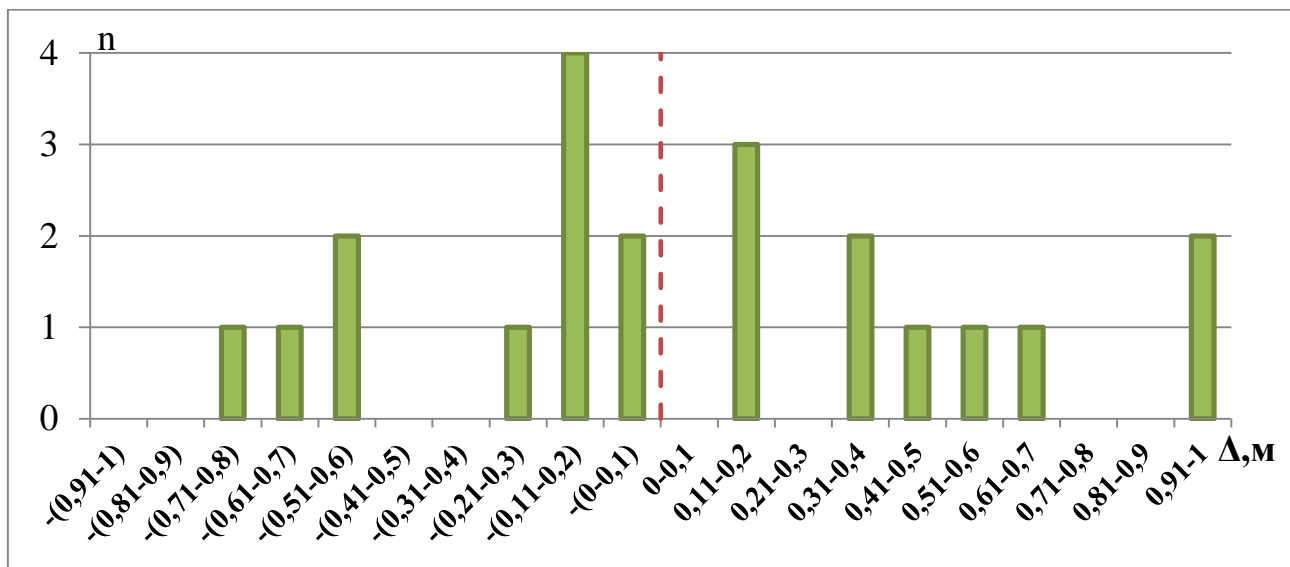


Рисунок 3.12 – Распределения абсолютных ошибок восстановления прозрачности по спутнику Sentinel-2.

На рисунке 3.12. видно, что общее количество завышений восстановленных значений над измеренными – 11, а занижений 10. Максимум, 4 повторения, находится в интервале завышения от 0,11 до 0,2 м.

По выведенным формулам было построено пространственное распределение прозрачности всей акватории Ладожского озера (рисунки 3.13-3.16).

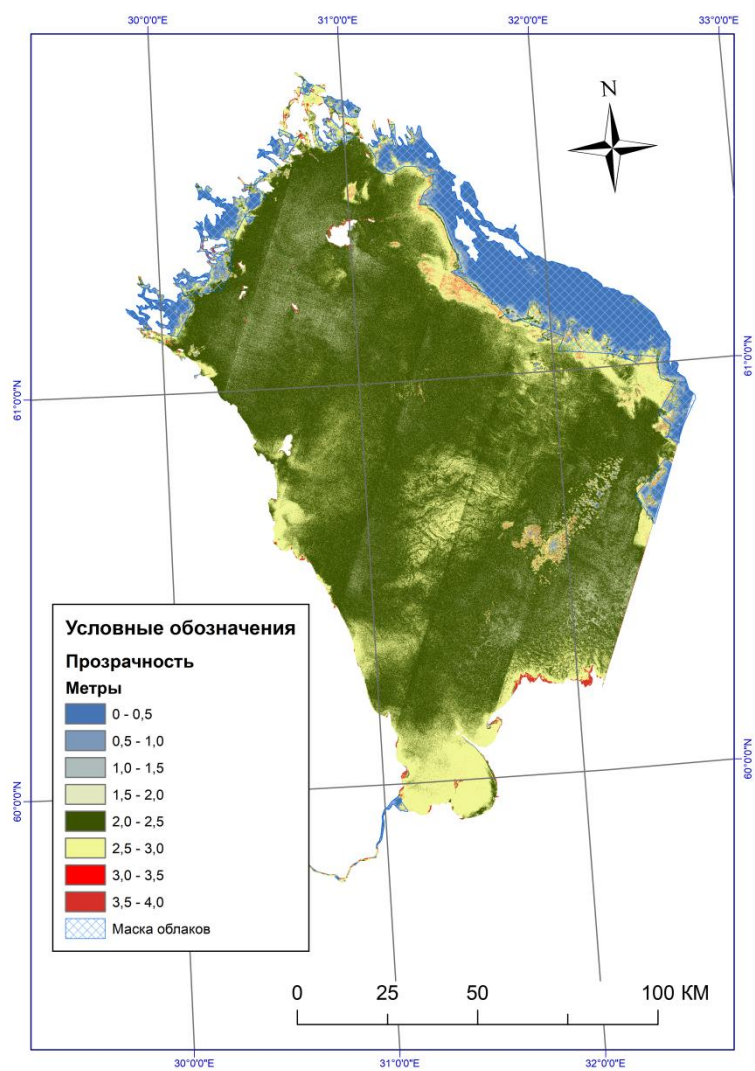


Рисунок 3.13 – Прозрачность Ладожского озера, Sentinel-2, 2017 г.

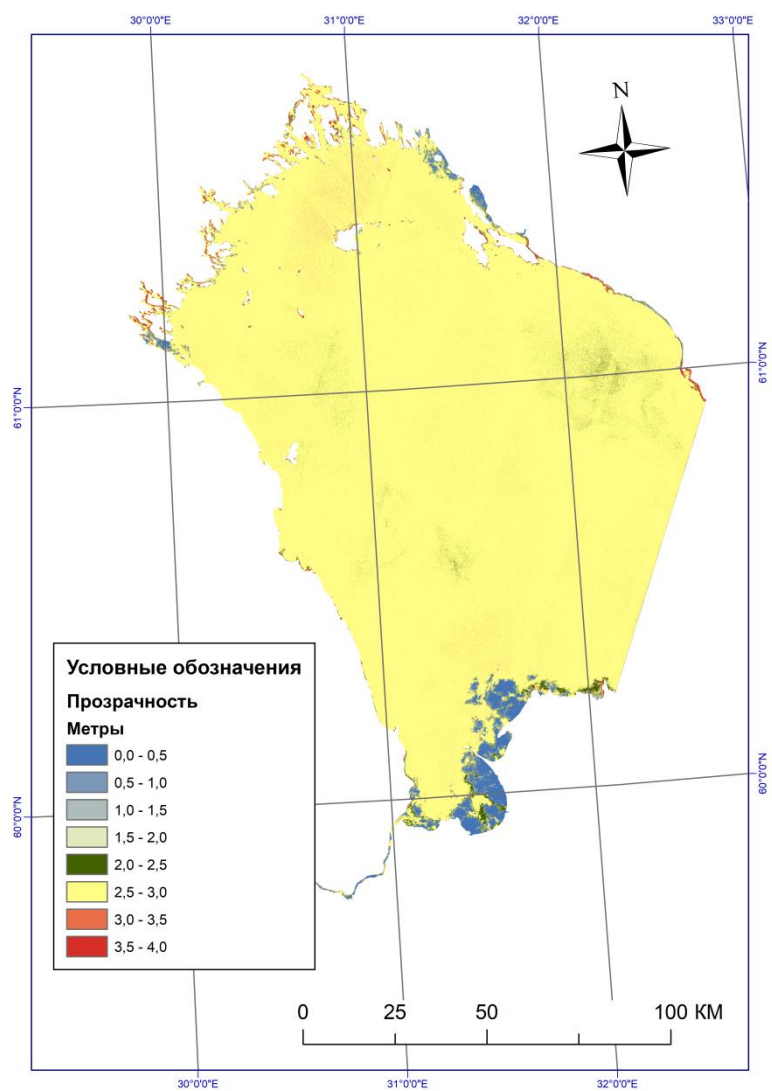


Рисунок 3.14 – Прозрачность Ладожского озера, Sentinel-2, 2019 г.

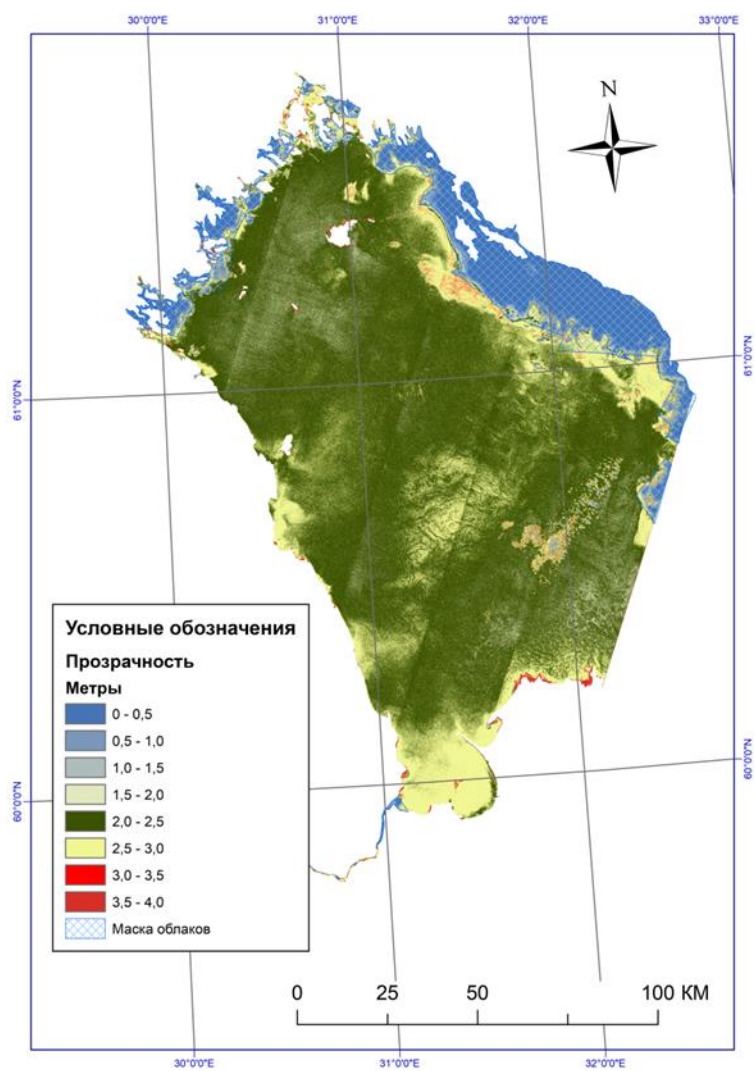


Рисунок 3.15 – Прозрачность Ладожского озера, Landsat 8, 2017 г

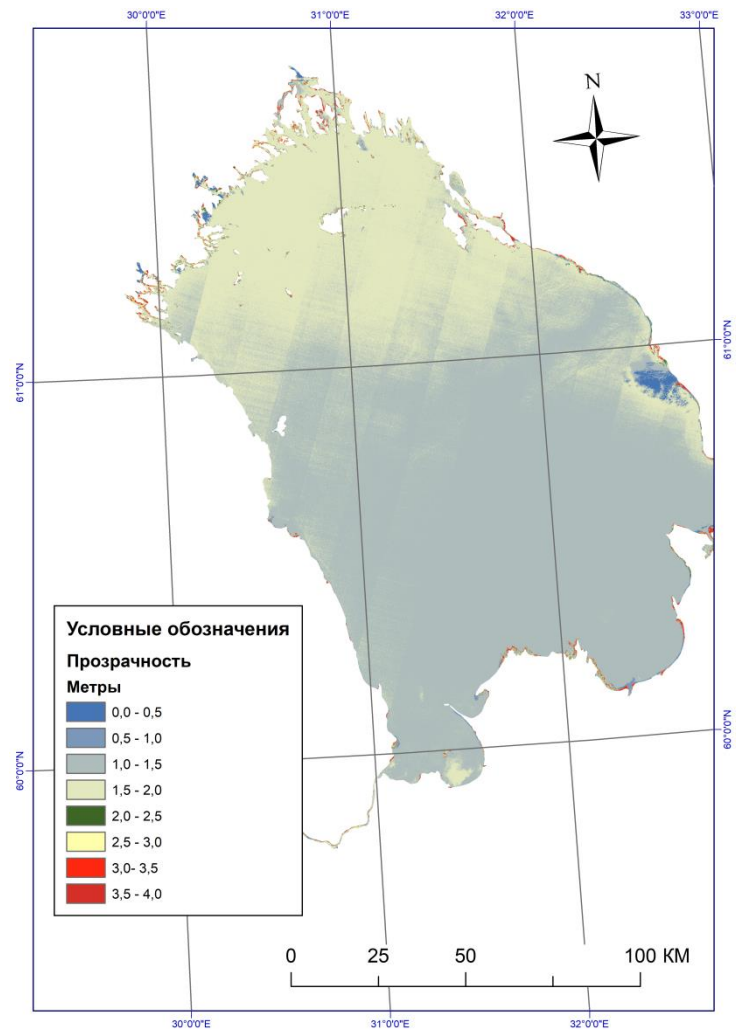


Рисунок 3.16 – Прозрачность Ладожского озера, Landsat 8, 2019 г.



#### 4 Апробация

Для дальнейших исследований было решено расширить набор данных. Экспедиционные исследования на Ладожском озере проводятся ежегодно, 2021 год не стал исключением. Данные были предоставлены лично М.А. Науменко, доктором географических наук, профессором.

Набор полученных за 2021 год данных состоял из 49 точек, в каждой из которой была известна глубина(м) и прозрачность (м) (таблица 4.1). Экспедиция проходила с 01.07 по 07.07.21 гг.

Таблица 4.1 – Данные мониторинга Ладожского озера за с 01.07 по 07.07 2021 г.

№	Дата	Широта	Долгота	Глубина, м	Прозрачность Т, м
1	01.07.2021	60.4405	32.459	20.4	2.9
2	01.07.2021	60.3999	32.4993	13.5	2
3	01.07.2021	60.313	32.4618	15	1.8
4	01.07.2021	60.3077	32.2247	7	3.1
5	01.07.2021	60.3888	32.2428	12	2.9
6	01.07.2021	60.4927	32.2465	21	3.4
7	01.07.2021	60.4694	32.0396	13	2.3
8	01.07.2021	60.3962	31.8669	15	2.1
9	02.07.2021	60.3664	31.7343	15	3.4
10	02.07.2021	60.2741	31.4667	16	3.3
11	02.07.2021	60.1023	31.2126	11.3	3.5
12	02.07.2021	60.0679	31.3499	8	3.6
13	02.07.2021	60.2312	31.1847	8	2.4
14	02.07.2021	60.3205	31.0592	18	2.7
15	02.07.2021	60.3927	31.3656	9.5	2.7
16	02.07.2021	60.3569	31.2169	17.8	2.7
17	02.07.2021	60.4353	30.9157	10.9	2.6
18	03.07.2021	60.4762	31.061	26.9	2.8
19	03.07.2021	60.422	31.5523	25	2.7
20	03.07.2021	60.516	31.4908	40	2.6
21	03.07.2021	60.4388	31.7535	26	3.6
22	03.07.2021	60.5241	31.7231	32	3
23	03.07.2021	60.5901	31.6451	40	3.1
24	03.07.2021	60.5722	31.3926	53	2.4
25	03.07.2021	60.5706	31.2462	39	2.2
26	03.07.2021	60.5822	30.9325	16	1.5

№	Дата	Широта	Долгота	Глубина, м	Прозрачность Т, м
27	03.07.2021	60.5614	30.8363	13	2.9
28	04.07.2021	60.6378	30.6939	29	2.1
29	04.07.2021	60.6564	30.8199	10	3.1
30	04.07.2021	60.6958	30.9586	43	2.5
31	04.07.2021	60.6291	31.1478	36	2.6
32	04.07.2021	60.6558	31.2705	70	2.1
33	04.07.2021	60.6582	31.4041	63	1.9
34	04.07.2021	60.6891	30.5297	60	2.9
35	04.07.2021	60.7436	31.2553	72	2
36	04.07.2021	60.7142	31.0968	54	1.8
37	04.07.2021	60.8183	30.6034	15	2.1
38	05.07.2021	60.7904	30.6591	29.7	1.9
39	05.07.2021	60.797	30.7768	64	2.1
40	05.07.2021	60.8142	30.9156	70	2.2
41	05.07.2021	60.8295	31.0583	60	2.4
42	05.07.2021	60.8588	31.1947	74	2.2
43	05.07.2021	60.907	31.3811	75	2.2
44	07.07.2021	61.3553	30.8637	162	2.2
45	07.07.2021	61.4445	30.952	38	2.5
46	07.07.2021	61.4854	30.9129	120	2.4
47	07.07.2021	61.5017	30.9003	124	2.3
48	07.07.2021	61.5623	30.7668	86	2.1
49	07.07.2021	61.5787	30.6875	30	2.3

На рисунке 4.1. представлено расположение станций мониторинга Ладожского озера в 2021 году.

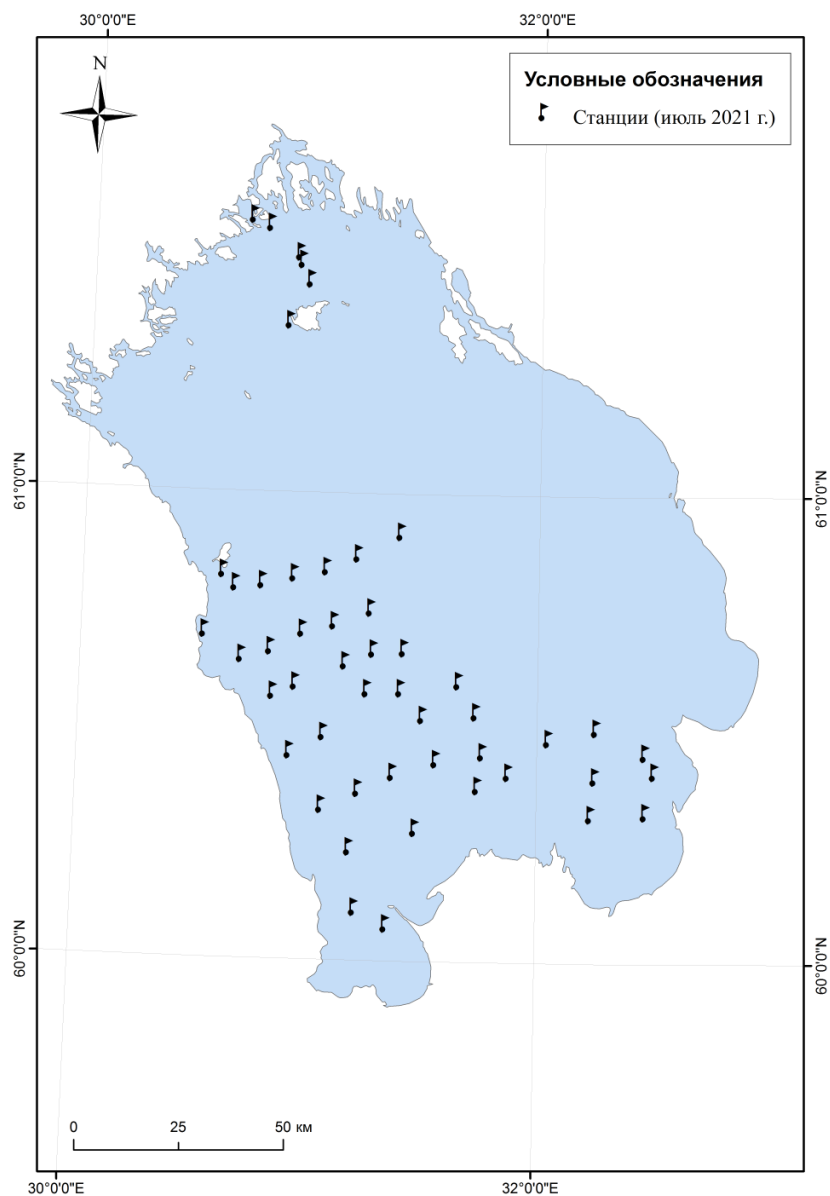


Рисунок 4.1 – Станции мониторинга Ладожского озера в 2021 году.

Имея натурные данные, то есть данные мониторинга Ладожского озера за 2021 год, была поставлена задача – найти спутниковые снимки на даты экспедиции, покрывающие всю акваторию озера по двум спутникам: Landsat 8 и Sentinel-2.

По техническим причинам, а именно, невозможность доступа к ранее использованным источникам, было решено продолжить работать только с одним спутником – Landsat 8. На нужный отрезок времени на сайте USGS

(Геологическая служба США) был найден набор снимков, покрывающих всю акваторию Ладожского озера (рисунок 4.2.).

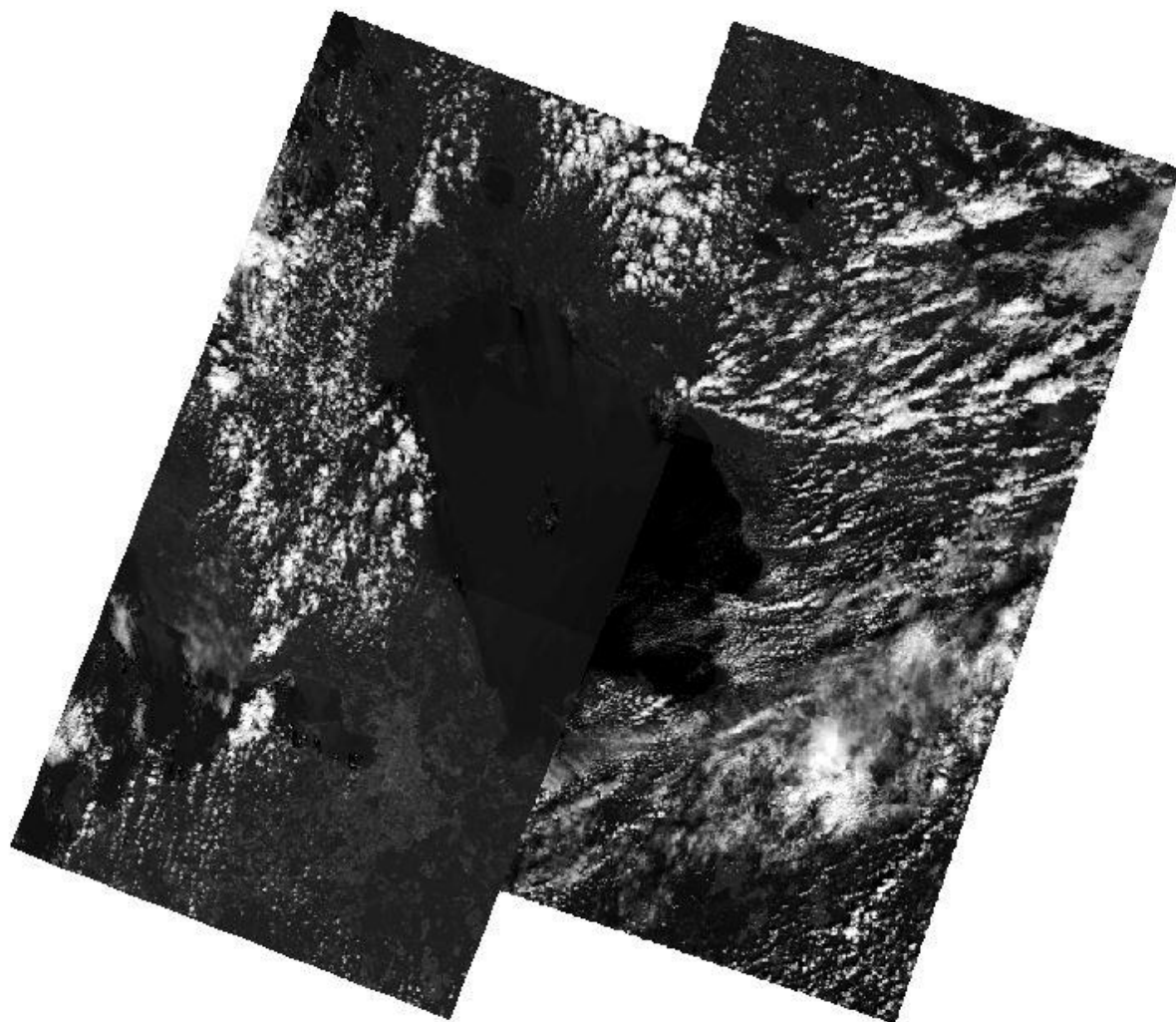


Рисунок 4.2 – Снимки Ладожского озера в компоновке.

Далее, как это описано в разделе 3.1.2, с помощью программы ArcGis была проведена обработка спутниковых снимков.

В результате, после обработки спутниковых данных, была сформирована таблица с номерами точек, их координатами, измеренной прозрачностью и данными по каналам, извлеченными со снимков (таблица 4.2.). Опираясь на проведенные ранее исследования, и выбранную для спутника Landsat 8

формулу (таблица 3.13), для дальнейшей работы нужны были значения яркости третьего и четвертого каналов.

Таблица 4.2 – Результаты обработки снимков спутника Landsat 8 за 2021 год.

№	Широта	Долгота	Прозрачность Т,м	3 канал	4 канал
1	60.4405	32.459	2.9	8022	7365
2	60.3999	32.4993	2	13177	13636
3	60.313	32.4618	1.8	8018	7529
4	60.3077	32.2247	3.1	7935	7479
5	60.3888	32.2428	2.9	10073	9757
6	60.4927	32.2465	3.4	7790	7323
7	60.4694	32.0396	2.3	7704	7369
8	60.3962	31.8669	2.1	7561	7237
9	60.3664	31.7343	3.4	7488	7153
10	60.2741	31.4667	3.3	7513	7184
11	60.1023	31.2126	3.5	8144	7282
12	60.0679	31.3499	3.6	7838	7417
13	60.2312	31.1847	2.4	7604	7468
14	60.3205	31.0592	2.7	7612	7469
15	60.3927	31.3656	2.7	7677	7375
16	60.3569	31.2169	2.7	7595	7459
17	60.4353	30.9157	2.6	7664	7496
18	60.4762	31.061	2.8	7819	7732
19	60.422	31.5523	2.7	7702	7421
20	60.516	31.4908	2.6	7742	7439
21	60.4388	31.7535	3.6	7756	7457
22	60.5241	31.7231	3	7636	7370
23	60.5901	31.6451	3.1	7518	7269
24	60.5722	31.3926	2.4	7653	7504
25	60.5706	31.2462	2.2	7723	7633
26	60.5822	30.9325	1.5	7911	7803
27	60.5614	30.8363	2.9	7758	7620
28	60.6378	30.6939	2.1	7564	7404
29	60.6564	30.8199	3.1	7816	7691
30	60.6958	30.9586	2.5	7816	7703
31	60.6291	31.1478	2.6	7841	7747
32	60.6558	31.2705	2.1	7780	7677
33	60.6582	31.4041	1.9	7659	7504
34	60.6891	30.5297	2.9	7923	7746
35	60.7436	31.2553	2	7836	7754

№	Широта	Долгота	Прозрачность Т,м	3 канал	4 канал
36	60.7142	31.0968	1.8	7851	7742
37	60.8183	30.6034	2.1	7892	7710
38	60.7904	30.6591	1.9	7660	7510
39	60.797	30.7768	2.1	7833	7695
40	60.8142	30.9156	2.2	7779	7660
41	60.8295	31.0583	2.4	7751	7591
42	60.8588	31.1947	2.2	7738	7590
43	60.907	31.3811	2.2	7200	7088
44	61.3553	30.8637	2.2	7629	7430
45	61.4445	30.952	2.5	7526	7356
46	61.4854	30.9129	2.4	7464	7279
47	61.5017	30.9003	2.3	7488	7304
48	61.5623	30.7668	2.1	7574	7402
49	61.5787	30.6875	2.3	7740	7582

#### 4.1 Результаты апробации формулы с использованием новых данных

После получения натуральных данных и данных со спутниковых снимков за 2021 год, ко всему ряду была применена формула, полученная в исследованиях за 2017 и 2019 года по спутнику Landsat 8(таблица 3.13).

Непосредственно значения прозрачности, полученные по формуле (1), представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Восстановленные значения прозрачности за 2021 год.

номер	Прозр	3к	4к	Восстан. Lп	Восстан. Прозрачность Т, м
1	2.9	8022	7365	0.303	1.35
2	2	13177	13636	-2.348	0.10
3	1.8	8018	7529	-0.127	0.88
4	3.1	7935	7479	-0.215	0.81
5	2.9	10073	9757	-0.488	0.61
6	3.4	7790	7323	-0.193	0.82
7	2.3	7704	7369	-0.534	0.59
8	2.1	7561	7237	-0.568	0.57

номер	Прозр	3к	4к	Восстан. Ln	Восстан. Прозрачность T, м
9	3.4	7488	7153	-0.543	0.58
10	3.3	7513	7184	-0.557	0.57
11	3.5	8144	7282	0.832	2.30
12	3.6	7838	7417	-0.309	0.73
13	2.4	7604	7468	-1.048	0.35
14	2.7	7612	7469	-1.029	0.36
15	2.7	7677	7375	-0.620	0.54
16	2.7	7595	7459	-1.048	0.35
17	2.6	7664	7496	-0.963	0.38
18	2.8	7819	7732	-1.165	0.31
19	2.7	7702	7421	-0.673	0.51
20	2.6	7742	7439	-0.615	0.54
21	3.6	7756	7457	-0.624	0.54
22	3	7636	7370	-0.714	0.49
23	3.1	7518	7269	-0.762	0.47
24	2.4	7653	7504	-1.012	0.36
25	2.2	7723	7633	-1.161	0.31
26	1.5	7911	7803	-1.107	0.33
27	2.9	7758	7620	-1.036	0.35
28	2.1	7564	7404	-0.988	0.37
29	3.1	7816	7691	-1.067	0.34
30	2.5	7816	7703	-1.098	0.33
31	2.6	7841	7747	-1.146	0.32
32	2.1	7780	7677	-1.125	0.32
33	1.9	7659	7504	-0.997	0.37
34	2.9	7923	7746	-0.930	0.39
35	2	7836	7754	-1.177	0.31
36	1.8	7851	7742	-1.107	0.33
37	2.1	7892	7710	-0.918	0.40
38	1.9	7660	7510	-1.010	0.36
39	2.1	7833	7695	-1.033	0.36
40	2.2	7779	7660	-1.084	0.34
41	2.4	7751	7591	-0.980	0.38
42	2.2	7738	7590	-1.012	0.36
43	2.2	7200	7088	-1.125	0.32
44	2.2	7629	7430	-0.885	0.41
45	2.5	7526	7356	-0.964	0.38
46	2.4	7464	7279	-0.928	0.40
47	2.3	7488	7304	-0.929	0.39
48	2.1	7574	7402	-0.957	0.38

номер	Прозр	3к	4к	Восстан. Ln	Восстан. Прозрачность T, м
49	2.3	7740	7582	-0.986	0.37

После вставки значений каналов в формулу, был проведен анализ полученных результатов, который показал увеличение относительных и абсолютных ошибок. Полученные погрешности приведены в таблице 4.4, также для сравнения приведены погрешности из таблицы 3.13.

Таблица 4.4 – Сравнение погрешностей полученных результатов.

год	Погрешность относительная, %			Погрешность абсолютная
	средняя	макс	мин	
2017 – 2019	12,59	70,9	0,01	0,31
2021	80,87	95,22	34,31	2,04

Как видно из таблицы 4.4 погрешности многократно увеличились, а, значит, восстановленные по данной формуле значения прозрачности не имеют достаточного соответствия с измеренными.

#### 4.2 Корректировка формулы

После неудовлетворительного результата была поставлена задача доработать формулу, учитывая данные за 2021, поэтому было принято решение дополнить ими имеющийся ряд данных за 2017 и 2019 года. Таким образом, получен ряд, состоящий из 183 точек наблюдения, с известными в них значениями прозрачности и данными по третьему и четвертому каналам. Как и в предыдущей части исследования, весь полученный ряд был разделен на большую часть и меньшую для последующей проверки (таблицы 4.5. и 4.6. соответственно).



Таблица 4.5 – Большая часть данных для апробации формулы.

№	Широта	Долгота	Прозрачность Т,м	3 канал	4 канал
1	60.313	32.4618	1.8	8018	7529
2	60.3077	32.2247	3.1	7935	7479
3	60.3888	32.2428	2.9	10073	9757
4	60.4927	32.2465	3.4	7790	7323
5	60.4694	32.0396	2.3	7704	7369
6	60.3962	31.8669	2.1	7561	7237
7	60.3664	31.7343	3.4	7488	7153
8	60.2312	31.1847	2.4	7604	7468
9	60.3205	31.0592	2.7	7612	7469
10	60.3927	31.3656	2.7	7677	7375
11	60.4762	31.061	2.8	7819	7732
12	60.516	31.4908	2.6	7742	7439
13	60.4388	31.7535	3.6	7756	7457
14	60.5241	31.7231	3	7636	7370
15	60.5706	31.2462	2.2	7723	7633
16	60.6378	30.6939	2.1	7564	7404
17	60.6564	30.8199	3.1	7816	7691
18	60.6958	30.9586	2.5	7816	7703
19	60.6291	31.1478	2.6	7841	7747
20	60.6558	31.2705	2.1	7780	7677
21	60.6582	31.4041	1.9	7659	7504
22	60.6891	30.5297	2.9	7923	7746
23	60.7436	31.2553	2	7836	7754
24	60.7904	30.6591	1.9	7660	7510
25	60.8295	31.0583	2.4	7751	7591
26	60.8588	31.1947	2.2	7738	7590
27	60.907	31.3811	2.2	7200	7088
28	61.3553	30.8637	2.2	7629	7430
29	61.4445	30.952	2.5	7526	7356
30	61.5017	30.9003	2.3	7488	7304
31	61.5623	30.7668	2.1	7574	7402
32	60.5699	32.7916	1.4	6661	6039
33	60.8082	32.0949	2	6684	6007
34	60.7137	32.1655	1.5	6703	6030
35	60.4848	32.3834	1.5	6584	5958
36	60.2022	32.4749	1.8	6666	6047
37	60.2409	32.276	2.9	6609	5963
38	60.3266	32.1308	2.5	6550	5901

№	Широта	Долгота	Прозрачность Т,м	3 канал	4 канал
39	60.588	32.0663	2.1	8428	7964
40	60.5042	31.6106	2.1	6619	5962
41	60.3897	31.1371	2.7	6719	6039
42	60.3999	31.491	3	6653	5989
43	60.0164	31.2435	2.5	6717	6068
44	60.3602	30.9405	2.2	6702	6023
45	60.6034	30.7083	1.7	6787	6092
46	60.6873	30.6354	2.1	6837	6158
47	60.6193	30.5556	1.5	6926	6214
48	60.8298	31.2909	2.7	6722	6032
49	60.9229	31.3466	2.7	6704	6038
50	60.9865	31.1503	2.6	6726	6036
51	60.8737	31.0548	2.3	6758	6065
52	61.1613	31.0163	2.1	6715	6016
53	61.2217	30.9531	2.3	6680	6012
54	61.0493	30.3117	2.5	6745	6039
55	61.1565	30.1972	2	7458	6769
56	61.3907	30.5959	2.5	6703	5997
57	61.4097	31.3502	2	6829	6120
58	61.3337	31.4248	2	6794	6106
59	61.5904	31.072	1.7	6825	6138
60	61.5724	31.4546	1.5	20830	20962
61	61.2192	31.5119	2.2	6892	6211
62	61.0606	31.4855	2.4	6753	6070
63	61.3932	31.049	3	7002	6279
64	61.3755	31.1693	2.8	6991	6279
65	61.3881	31.2367	2.5	7020	6295
66	61.4201	31.3947	2.4	7015	6276
67	61.4362	31.4443	3	7052	6317
68	61.4428	31.5135	3.9	7043	6314
69	61.4737	31.4369	3	7079	6346
70	61.4569	31.3906	2.7	7023	6290
71	61.4539	31.3406	3	7009	6266
72	61.434	31.2718	2.3	7018	6279
73	61.4225	31.206	2.3	7002	6266
74	61.4054	31.1416	3.9	7001	6270
75	61.4256	31.0329	3	6988	6246
76	61.4507	31.1239	3.2	6977	6259
77	61.4701	31.1839	2.7	6992	6250
78	61.4879	31.2397	2.4	7001	6278

№	Широта	Долгота	Прозрачность Т,м	3 канал	4 канал
79	61.5191	31.3749	3.9	7004	6283
80	61.5549	31.3096	2.6	7027	6279
81	61.5181	31.2067	2.5	6993	6264
82	61.5056	31.1402	2.7	6997	6264
83	61.488	31.0699	2.8	6975	6253
84	61.4797	30.9701	2.9	6986	6237
85	61.4535	30.9274	2.6	6981	6244
86	61.4042	30.8185	2.9	7000	6265
87	61.3581	30.5923	3	6982	6257
88	61.3242	30.4239	2.7	6984	6243
89	61.3047	30.3507	3.1	7023	6289
90	61.3693	30.4068	3	7027	6295
91	61.4379	30.389	2.7	7057	6307
92	61.4852	30.5215	3	7057	6308
93	61.5035	30.5032	2.6	7066	6306
94	61.4842	30.6556	3.1	7010	6272
95	61.4905	30.6622	2.9	7010	6256
96	61.4927	30.7184	2.9	6987	6246
97	61.5014	30.7392	3.1	7001	6259
98	61.503	30.7293	2.7	7013	6258
99	61.5032	30.7073	3	6999	6262
100	61.5367	30.6774	2.6	7043	6296
101	61.5356	30.7142	2.7	6998	6269
102	61.5281	30.7324	2.8	6996	6248
103	61.5318	30.7416	3.4	7004	6261
104	61.5456	30.7372	2.7	7037	6285
105	61.5611	30.7046	2.4	7105	6365
106	61.5202	30.7915	3.2	7002	6263
107	61.5219	30.8066	2.6	6997	6253
108	61.5208	30.8335	3.3	7005	6260
109	61.5307	30.8077	3	7009	6261
110	61.5571	30.7711	2.9	7035	6292
111	61.5546	30.7931	2.9	7038	6317
112	61.5493	30.8035	2.9	7031	6290
113	61.5574	30.8091	2.9	7068	6326
114	61.5665	30.8331	2.6	7039	6289
115	61.5228	30.8921	2.8	7023	6266
116	61.4978	30.8806	2.7	6983	6261
117	61.4881	30.8566	3	6969	6254
118	61.4243	30.6534	3.1	6996	6255

№	Широта	Долгота	Прозрачность Т,м	3 канал	4 канал
119	61.389	30.5225	2.7	7001	6269
120	61.307	30.5642	2.8	6988	6244
121	61.2854	30.4399	3.5	7016	6291
122	61.1973	30.2703	3.4	6982	6243
123	61.2131	30.3964	2.7	6980	6256
124	61.2713	30.6264	3.7	6990	6238
125	61.3294	30.7635	2.5	6990	6240
126	61.3116	30.8092	2.5	6984	6254
127	61.334	30.8919	2.5	6976	6254
128	61.3585	30.824	2.9	6990	6241
129	61.373	30.8816	2.7	6992	6248
130	61.3982	31.1472	2.5	7033	6300
131	61.6991	30.6878	2.7	7344	6640
132	61.6185	30.7217	2.8	7168	6424
133	61.5745	30.8593	3.1	7062	6328
134	61.5373	31.0437	3.4	7003	6278
135	61.5722	31.1699	3.1	7040	6285
136	61.6027	31.0504	2.4	7049	6294
137	61.6387	31.0642	2.3	7100	6370
138	61.6665	31.008	2.1	7107	6391
139	61.6064	30.9726	2.4	7132	6381
140	61.6148	30.8583	2.7	7090	6339
141	61.6017	30.7758	2.5	7092	6322

Таблица 4.6 – Меньшая часть данных для апробации формулы.

№	Широта	Долгота	Прозрачность Т,м	3 канал	4 канал
1	60.4405	32.459	2.9	8022	7365
2	60.3999	32.4993	2	13177	13636
3	60.2741	31.4667	3.3	7513	7184
4	60.1023	31.2126	3.5	8144	7282
5	60.0679	31.3499	3.6	7838	7417
6	60.3569	31.2169	2.7	7595	7459
7	60.4353	30.9157	2.6	7664	7496
8	60.422	31.5523	2.7	7702	7421
9	60.5901	31.6451	3.1	7518	7269
10	60.5722	31.3926	2.4	7653	7504

№	Широта	Долгота	Прозрачность Т,м	3 канал	4 канал
11	60.5822	30.9325	1.5	7911	7803
12	60.5614	30.8363	2.9	7758	7620
13	60.7142	31.0968	1.8	7851	7742
14	60.8183	30.6034	2.1	7892	7710
15	60.797	30.7768	2.1	7833	7695
16	60.8142	30.9156	2.2	7779	7660
17	61.4854	30.9129	2.4	7464	7279
18	61.5787	30.6875	2.3	7740	7582
19	60.715	32.5709	1.8	11601	11558
20	60.1613	32.3534	0.4	6803	6419
21	60.9068	31.9161	2.5	9457	9096
22	60.15	31.3067	3	6654	5991
23	60.7618	30.7065	2.3	6760	6070
24	60.7845	31.5341	1.7	6838	6161
25	60.9631	30.5848	2.8	6725	6040
26	61.2647	31.0918	2.2	6699	6018
27	61.5693	30.8987	1.7	6822	6135
28	61.5367	31.4044	1.6	6941	6212
29	61.3689	31.105	2.6	6985	6244
30	61.3946	31.2941	2.7	6999	6271
31	61.4414	31.5296	3.3	7161	6424
32	61.43	30.9934	2.4	6971	6238
33	61.5337	31.2535	2.6	7034	6306
34	61.4415	30.5063	2.7	7039	6300
35	61.4964	30.6771	3.2	6974	6255
36	61.5109	30.7027	2.9	6996	6256
37	61.5905	30.8041	2.6	7071	6319
38	61.5056	30.9577	2.7	7005	6272
39	61.2561	30.5247	3.7	6978	6225
40	61.4634	30.9066	2.3	6968	6246
41	61.6005	31.2019	3.7	7053	6305
42	61.6449	30.6752	1.9	7251	6543

Задача главным образом состояла в корректировке имеющейся формулы для полученного ряда путем перебора подходящих комбинаций имеющихся яркостей четвертого и пятого каналов. Главным критерием отбора подходящих комбинаций являлось значение множественного коэффициента корреляции, а

также ошибок восстановленных значений прозрачности воды Ладожского озера по выбранной формуле.

#### 4.2.1 Подбор функциональных зависимостей

Как уже было описано выше, ряд был разделен на большую и меньшую части, подбор функциональных зависимостей шел на основе большей части материала. В таблице 4.7 представлены комбинации, которые были изучены. Также коэффициенты множественной корреляции, соответствующие им и погрешности восстановленных по формуле значений прозрачности.

Таблица 4.7 – Комбинации каналов

№	Комбинации каналов	Коэффициент множественной корреляции	Погрешности	
			Абсолютная	Относительная
1	4,3	0,28	0,36	14,8
2	4,3,3/4,4/3	0,49	0,33	13,4
3	3,4/3,3/4	0,27	0,36	14,8
4	4,4/3,3/4	0,27	0,36	14,8
5	4,3,3/4,4/3,2	0,5	0,34	13,4
6	4,3,2	0,4	0,34	14
7	4,3,3/4,4/3,2,2/3	0,51	0,33	13,3
8	4,3,4/3	0,43	0,34	13,8
9	4,3,3/4	0,41	0,34	13,9

Исходя из полученных результатов (таблица 4.7), была выбрана комбинация №7, так как именно с этим набором каналов наблюдается максимальный коэффициент множественной корреляции.

Таким образом, скорректированная формула определения прозрачности для ряда данных за три года наблюдений приобрела вид:

$$T = e^{(-200.3 + (-0.0033 * (4K)) + 0,003 * (3K) + 117 * (\frac{4K}{3K}) + 87 * (\frac{3K}{4K}) + 0,0002 * (2K) - 3,58 * (\frac{2K}{3K}))} \quad (2)$$

Часть результатов восстановления прозрачности воды Ладожского озера по формуле (2) представлены в таблице 4.8, таблица с результатами по всем точкам находится в приложении А.

Таблица 4.8 – Восстановленные значения прозрачности воды Ладожского озера после апробации формулы (часть таблицы).

№	Прозрач- ность Т,м	4к	3к	4/3	3/4	2к	2/3	Восстан Lп	Восстан. значения прозрачности
1	1.8	7529	8018	0.9390	1.0649	7787	0.9712	1.09	2.96
2	3.1	7479	7935	0.9425	1.0610	7702	0.9706	1.04	2.83
3	2.9	9757	10073	0.9686	1.0324	9238	0.9171	1.08	2.95
4	3.4	7323	7790	0.9401	1.0638	7574	0.9723	1.04	2.82
5	2.3	7369	7704	0.9565	1.0455	7618	0.9888	0.89	2.44
6	2.1	7237	7561	0.9571	1.0448	7414	0.9806	0.88	2.42
7	3.4	7153	7488	0.9553	1.0468	7333	0.9793	0.89	2.43
8	2.4	7468	7604	0.9821	1.0182	7373	0.9696	0.86	2.36
9	2.7	7469	7612	0.9812	1.0191	7363	0.9673	0.86	2.36
10	2.7	7375	7677	0.9607	1.0409	7778	1.0132	0.83	2.30
11	2.8	7732	7819	0.9889	1.0113	7434	0.9508	0.89	2.44
12	2.6	7439	7742	0.9609	1.0407	7824	1.0106	0.84	2.33
13	3.6	7457	7756	0.9614	1.0401	7828	1.0093	0.85	2.33
14	3	7370	7636	0.9652	1.0361	7660	1.0031	0.83	2.29
15	2.2	7633	7723	0.9883	1.0118	7419	0.9606	0.88	2.40
16	2.1	7404	7564	0.9788	1.0216	7300	0.9651	0.86	2.37
...									
132	2.8	6424	7168	0.8962	1.1158	8563	1.1946	1.07	2.92
133	3.1	6328	7062	0.8961	1.1160	8533	1.2083	1.01	2.75
134	3.4	6278	7003	0.8965	1.1155	8479	1.2108	0.98	2.66
135	3.1	6285	7040	0.8928	1.1201	8513	1.2092	1.06	2.88
136	2.4	6294	7049	0.8929	1.1200	8493	1.2049	1.06	2.90
137	2.3	6370	7100	0.8972	1.1146	8517	1.1996	1.02	2.78
138	2.1	6391	7107	0.8993	1.1120	8506	1.1968	1.00	2.71
139	2.4	6381	7132	0.8947	1.1177	8551	1.1990	1.08	2.93
140	2.7	6339	7090	0.8941	1.1185	8528	1.2028	1.06	2.90
141	2.5	6322	7092	0.8914	1.1218	8525	1.2021	1.11	3.04

Значение средней относительной ошибки после восстановления значений прозрачности равно 13,36%, максимальной –70,54%, минимальной – 0,03%. Значение абсолютной погрешности не превышает 0,34 м.

#### 4.2.2 Апробация функциональных зависимостей на независимом материале

Последний этап исследований заключался в проверке полученной по формуле (2) зависимости на меньшей части ряда данных.

Восстановленные по формуле (2) значения прозрачности воды для спутника Landsat 8 представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Восстановленные значения прозрачности воды

№	Прозр	4к	3к	4/3	3/4	2к	2/3	Восстан. Lп	Восстан. значения прозрачности
1	2.9	7365	8022	0.918	1.089	7572	0.9439	1.369	3.933
2	2	13636	13177	1.035	0.966	11557	0.8771	0.270	1.310
3	3.3	7184	7513	0.956	1.046	7389	0.9835	0.878	2.407
4	3.5	7282	8144	0.894	1.118	7573	0.9299	1.830	6.237
5	3.6	7417	7838	0.946	1.057	7863	1.0032	0.951	2.587
6	2.7	7459	7595	0.982	1.018	7366	0.9698	0.857	2.355
7	2.6	7496	7664	0.978	1.022	7414	0.9674	0.863	2.369
8	2.7	7421	7702	0.964	1.038	7780	1.0101	0.831	2.296
9	3.1	7269	7518	0.967	1.034	7537	1.0025	0.816	2.262
10	2.4	7504	7653	0.981	1.020	7423	0.9699	0.858	2.358
11	1.5	7803	7911	0.986	1.014	7540	0.9531	0.887	2.428
12	2.9	7620	7758	0.982	1.018	7457	0.9612	0.873	2.394
13	1.8	7742	7851	0.986	1.014	7513	0.9569	0.881	2.414
14	2.1	7710	7892	0.977	1.024	7673	0.9723	0.866	2.377
15	2.1	7695	7833	0.982	1.018	7516	0.9595	0.877	2.404
16	2.2	7660	7779	0.985	1.016	7488	0.9626	0.872	2.391
17	2.4	7279	7464	0.975	1.025	7300	0.9780	0.839	2.314
18	2.3	7582	7740	0.980	1.021	7632	0.9860	0.837	2.310
19	1.8	11558	11601	0.996	1.004	12795	1.1029	0.738	2.092



№	Прозр	4к	3к	4/3	3/4	2к	2/3	Восстан. Ln	Восстан. значения прозрачности
20	0.4	6419	6803	0.944	1.060	7977	1.1726	0.515	1.673
21	2.5	9096	9457	0.962	1.040	10605	1.1214	0.910	2.485
22	3	5991	6654	0.900	1.111	8052	1.2101	0.793	2.211
23	2.3	6070	6760	0.898	1.114	8238	1.2186	0.852	2.344
24	1.7	6161	6838	0.901	1.110	8249	1.2063	0.858	2.358
25	2.8	6040	6725	0.898	1.113	8195	1.2186	0.836	2.307
26	2.2	6018	6699	0.898	1.113	8138	1.2148	0.830	2.293
27	1.7	6135	6822	0.899	1.112	8295	1.2159	0.860	2.363
28	1.6	6212	6941	0.895	1.117	8471	1.2204	0.963	2.620
29	2.6	6244	6985	0.894	1.119	8457	1.2107	1.013	2.754
30	2.7	6271	6999	0.896	1.116	8478	1.2113	0.984	2.676
31	3.3	6424	7161	0.897	1.115	8592	1.1998	1.046	2.847
32	2.4	6238	6971	0.895	1.118	8432	1.2096	0.994	2.703
33	2.6	6306	7034	0.897	1.115	8510	1.2098	0.992	2.696
34	2.7	6300	7039	0.895	1.117	8486	1.2056	1.024	2.786
35	3.2	6255	6974	0.897	1.115	8471	1.2147	0.955	2.598
36	2.9	6256	6996	0.894	1.118	8484	1.2127	1.009	2.743
37	2.6	6319	7071	0.894	1.119	8521	1.2051	1.060	2.886
38	2.7	6272	7005	0.895	1.117	8482	1.2108	0.997	2.711
39	3.7	6225	6978	0.892	1.121	8441	1.2097	1.042	2.836
40	2.3	6246	6968	0.896	1.116	8437	1.2108	0.967	2.630
41	3.7	6305	7053	0.894	1.119	8500	1.2052	1.048	2.852
42	1.9	6543	7251	0.902	1.108	8603	1.1865	1.017	2.766

#### 4.3 Результаты и их анализ

После применения полученной формулы на независимом материале, важно было провести анализ соответствия восстановленных и натуральных значений прозрачности воды Ладожского озера.

Значение средней относительной ошибки после восстановления значений прозрачности равно 18,36 %, максимальной –63,7 %, минимальной – 0,39 %. Значение абсолютной погрешности не превышает 0,43 м.

Наглядное представление распределения ошибок приведено на рисунке 4.3.

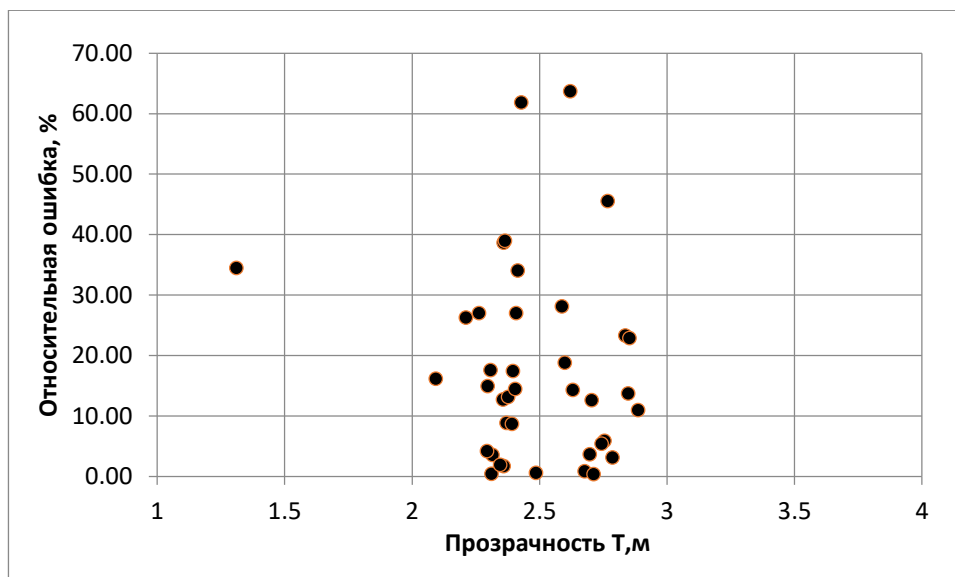


Рисунок 4.3 – Зависимость относительных ошибок от прозрачности воды по спутнику *Landsat 8*.

Из рисунка 4.3 видно, что относительная погрешность не зависит от величины прозрачности.

Помимо оценки относительных погрешностей, важно было оценить абсолютные погрешности.

На рисунке 4.4. представлена гистограмма с абсолютными погрешностями с учетом знака.

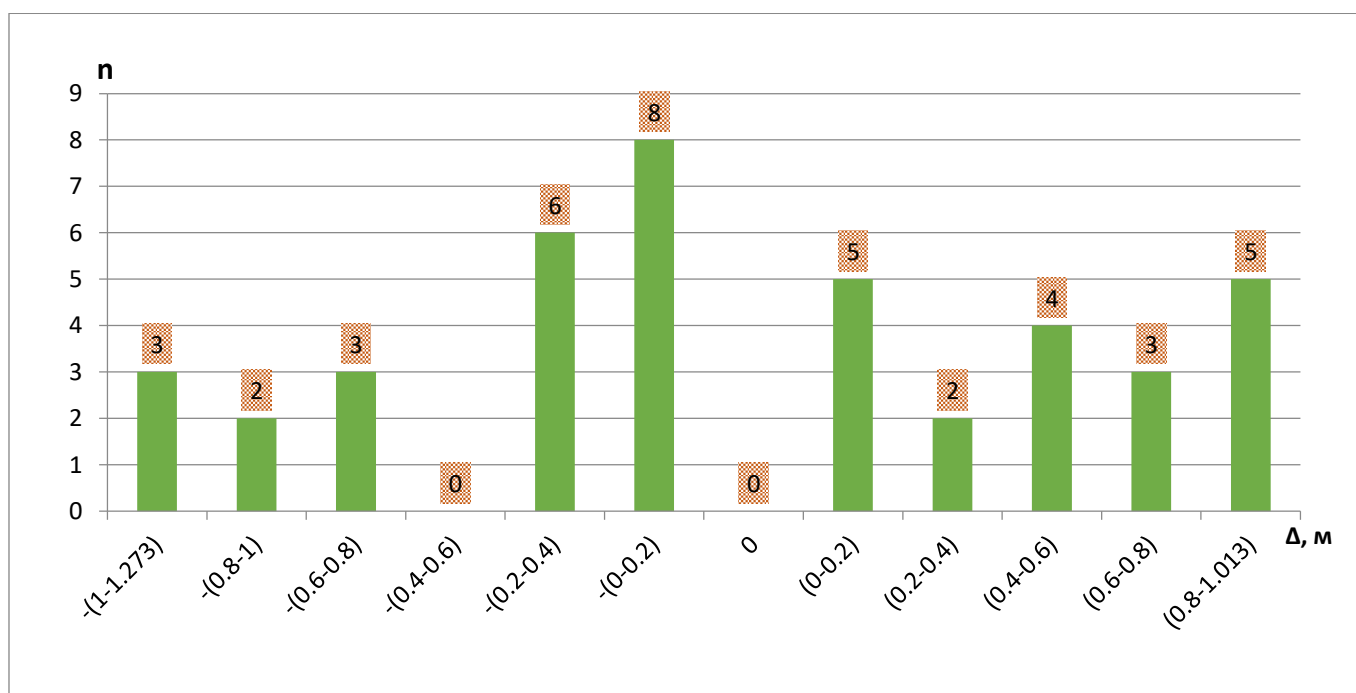


Рисунок 4.4 – Распределение абсолютных ошибок восстановления прозрачности по спутнику *Landsat 8*.

Анализируя гистограмму видно, что количество завышений восстановленных значений прозрачности больше (22 случая), чем их занижений (19 случаев). Погрешность определения прозрачности распределена равномерно по всему диапазону ошибок. Наибольшее количество ошибок наблюдается в диапазоне от 0 до  $-0,4$  м, наименьшее – от  $-0,4$  до  $-0,6$  м.

По полученной зависимости была построена карта распределения прозрачности воды по акватории Ладожского озера (рисунок 4.5). Из анализа карты видно, что большая часть акватории имеет прозрачность от  $0,6$  до  $1$  м, что слабо связано с реальными значениями прозрачности экспедиционного мониторинга. Цветные зоны (красный цвет) не являются прозрачностью, так как в этих местах акваторию на снимках покрывает облачность.

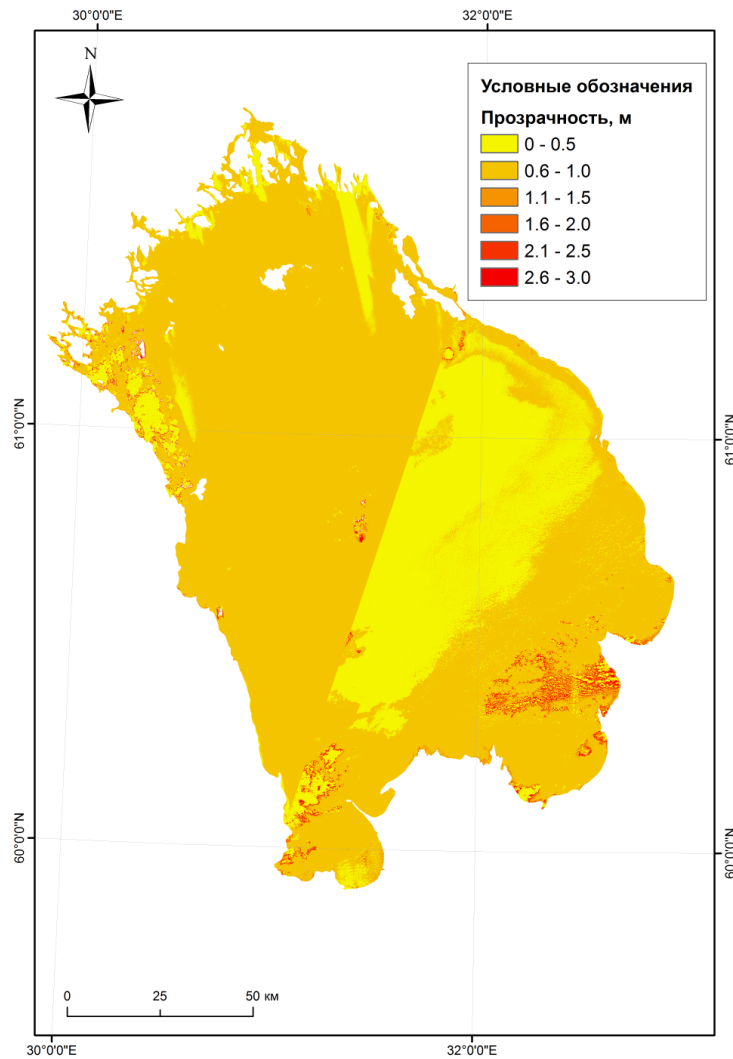


Рисунок 4.5 – Карта прозрачности Ладожского озера, полученная по восстановленным данным.

Возможными причинами такого расхождения могут быть: облачность, которая искажает показания спектральных яркостей каналов, неправильная трактовка программой ArcGIS сшитых за разные даты снимков (на рисунке 4.5. видна линия, по которой проходит граница дат), а также вероятный износ аппаратуры оптических сенсоров.

## Заключение

В ходе выполнения исследования были решены следующие задачи:

- a) изучены публикации по тематике исследования;
- b) собраны данные натурных экспедиционных измерений прозрачности за 2021 год;
- c) получены и обработаны снимки спутников *Landsat 8* и *Sentinel-2*;
- d) обработаны натурные и спутниковые данные о прозрачности воды за 2021 год с целью получения зависимости, позволяющей получать характеристики прозрачности воды при отсутствии фактических данных;
- e) проверены и скорректированы полученные зависимости.

Работа по выявлению методики определения прозрачности воды Ладожского озера была проведена по снимкам спутника *Landsat 8* с использованием натурных данных за 2021 год, которые были добавлены в уже имеющийся ряд за 2017 и 2019 года. Несмотря на то, что экспедиции проходили в один и тот же месяц, формула для восстановления прозрачности по спутниковым снимкам, выведенная на основе исследований за ранее указанные года, показала большие расхождения с экспедиционными данными за 2021 год. Относительные и абсолютные погрешности на порядок увеличились: 80,9 % и 2,04 м соответственно.

После неудовлетворительного результата была поставлена задача – доработать имеющуюся формулу и, тем самым, понизить ошибки при восстановлении по ней значений прозрачности воды. Данная задача была решена путем добавления значений второго мультиспектрального канала. Скорректированная формула дала хорошие результаты на независимом материале, а именно, средняя относительная ошибка приняла значение 18,4 %, а среднее значение абсолютной ошибки не превысило 0,43 м.

В результате исследований была разработана функциональная зависимость определения прозрачности воды Ладожского озера по спутниковым снимкам. Однако, при построении пространственного

распределения прозрачности по полученной формуле для всей акватории, оказалось, что результаты слабо связаны с реальными значениями мониторинга озера.

Приложение А - Восстановленные значения прозрачности воды Ладожского озера после апробации формулы

Таблица 1. Восстановленные значения прозрачности воды Ладожского озера после апробации формулы

№	Прозр	4к	3к	4/3	3/4	2к	2/3	Восстан Lп	восстан. значения прозрачности
1	1.8	7529	8018	0.9390	1.0649	7787	0.9712	1.09	2.96
2	3.1	7479	7935	0.9425	1.0610	7702	0.9706	1.04	2.83
3	2.9	9757	10073	0.9686	1.0324	9238	0.9171	1.08	2.95
4	3.4	7323	7790	0.9401	1.0638	7574	0.9723	1.04	2.82
5	2.3	7369	7704	0.9565	1.0455	7618	0.9888	0.89	2.44
6	2.1	7237	7561	0.9571	1.0448	7414	0.9806	0.88	2.42
7	3.4	7153	7488	0.9553	1.0468	7333	0.9793	0.89	2.43
8	2.4	7468	7604	0.9821	1.0182	7373	0.9696	0.86	2.36
9	2.7	7469	7612	0.9812	1.0191	7363	0.9673	0.86	2.36
10	2.7	7375	7677	0.9607	1.0409	7778	1.0132	0.83	2.30
11	2.8	7732	7819	0.9889	1.0113	7434	0.9508	0.89	2.44
12	2.6	7439	7742	0.9609	1.0407	7824	1.0106	0.84	2.33
13	3.6	7457	7756	0.9614	1.0401	7828	1.0093	0.85	2.33
14	3	7370	7636	0.9652	1.0361	7660	1.0031	0.83	2.29
15	2.2	7633	7723	0.9883	1.0118	7419	0.9606	0.88	2.40
16	2.1	7404	7564	0.9788	1.0216	7300	0.9651	0.86	2.37
17	3.1	7691	7816	0.9840	1.0163	7527	0.9630	0.87	2.39
18	2.5	7703	7816	0.9855	1.0147	7500	0.9596	0.88	2.40
19	2.6	7747	7841	0.9880	1.0121	7486	0.9547	0.89	2.42
20	2.1	7677	7780	0.9868	1.0134	7465	0.9595	0.88	2.40
21	1.9	7504	7659	0.9798	1.0207	7434	0.9706	0.86	2.36
22	2.9	7746	7923	0.9777	1.0229	7646	0.9650	0.88	2.40
23	2	7754	7836	0.9895	1.0106	7498	0.9569	0.88	2.42
24	1.9	7510	7660	0.9804	1.0200	7202	0.9402	0.90	2.46
25	2.4	7591	7751	0.9794	1.0211	7529	0.9714	0.86	2.36
26	2.2	7590	7738	0.9809	1.0195	7488	0.9677	0.86	2.37
27	2.2	7088	7200	0.9844	1.0158	6394	0.8881	0.98	2.67
28	2.2	7430	7629	0.9739	1.0268	7444	0.9758	0.85	2.34
29	2.5	7356	7526	0.9774	1.0231	7342	0.9756	0.85	2.33
30	2.3	7304	7488	0.9754	1.0252	7344	0.9808	0.84	2.31
31	2.1	7402	7574	0.9773	1.0232	7388	0.9754	0.85	2.33
32	1.4	6039	6661	0.9066	1.1030	7948	1.1932	0.74	2.11

№	Прозр	4к	3к	4/3	3/4	2к	2/3	Восстан Ln	восстан. значения прозрачности
33	2	6007	6684	0.8987	1.1127	8058	1.2056	0.84	2.31
34	1.5	6030	6703	0.8996	1.1116	8088	1.2066	0.83	2.29
35	1.5	5958	6584	0.9049	1.1051	7927	1.2040	0.72	2.05
36	1.8	6047	6666	0.9071	1.1024	7903	1.1856	0.75	2.12
37	2.9	5963	6609	0.9023	1.1083	7896	1.1947	0.78	2.18
38	2.5	5901	6550	0.9009	1.1100	7895	1.2053	0.76	2.13
39	2.1	7964	8428	0.9449	1.0583	9677	1.1482	0.87	2.39
40	2.1	5962	6619	0.9007	1.1102	8019	1.2115	0.77	2.17
41	2.7	6039	6719	0.8988	1.1126	8139	1.2113	0.84	2.31
42	3	5989	6653	0.9002	1.1109	8033	1.2074	0.80	2.23
43	2.5	6068	6717	0.9034	1.1070	8113	1.2078	0.78	2.18
44	2.2	6023	6702	0.8987	1.1127	8144	1.2152	0.83	2.28
45	1.7	6092	6787	0.8976	1.1141	8244	1.2147	0.87	2.40
46	2.1	6158	6837	0.9007	1.1103	8290	1.2125	0.85	2.34
47	1.5	6214	6926	0.8972	1.1146	8383	1.2104	0.94	2.56
48	2.7	6032	6722	0.8974	1.1144	8142	1.2112	0.86	2.36
49	2.7	6038	6704	0.9007	1.1103	8168	1.2184	0.79	2.21
50	2.6	6036	6726	0.8974	1.1143	8156	1.2126	0.86	2.36
51	2.3	6065	6758	0.8975	1.1143	8196	1.2128	0.87	2.38
52	2.1	6016	6715	0.8959	1.1162	8165	1.2159	0.87	2.39
53	2.3	6012	6680	0.9000	1.1111	8137	1.2181	0.79	2.21
54	2.5	6039	6745	0.8953	1.1169	8245	1.2224	0.88	2.41
55	2	6769	7458	0.9076	1.1018	9056	1.2143	0.97	2.63
56	2.5	5997	6703	0.8947	1.1177	8174	1.2195	0.88	2.40
57	2	6120	6829	0.8962	1.1158	8262	1.2098	0.92	2.51
58	2	6106	6794	0.8987	1.1127	8267	1.2168	0.86	2.35
59	1.7	6138	6825	0.8993	1.1119	8315	1.2183	0.86	2.35
60	1.5	20962	20830	1.0063	0.9937	22556	1.0829	0.41	1.51
61	2.2	6211	6892	0.9012	1.1096	8361	1.2131	0.86	2.37
62	2.4	6070	6753	0.8989	1.1125	8183	1.2118	0.85	2.33
63	3	6279	7002	0.8967	1.1151	8471	1.2098	0.98	2.65
64	2.8	6279	6991	0.8982	1.1134	8471	1.2117	0.95	2.58
65	2.5	6295	7020	0.8967	1.1152	8498	1.2105	0.98	2.67
66	2.4	6276	7015	0.8947	1.1178	8468	1.2071	1.02	2.77
67	3	6317	7052	0.8958	1.1164	8514	1.2073	1.01	2.76
68	3.9	6314	7043	0.8965	1.1155	8484	1.2046	1.00	2.73
69	3	6346	7079	0.8965	1.1155	8508	1.2019	1.02	2.78
70	2.7	6290	7023	0.8956	1.1165	8494	1.2095	1.00	2.72
71	3	6266	7009	0.8940	1.1186	8481	1.2100	1.02	2.78
72	2.3	6279	7018	0.8947	1.1177	8470	1.2069	1.02	2.77



№	Прозр	4к	3к	4/3	3/4	2к	2/3	Восстан Ln	восстан. значения прозрачности
73	2.3	6266	7002	0.8949	1.1175	8472	1.2099	1.01	2.73
74	3.9	6270	7001	0.8956	1.1166	8464	1.2090	1.00	2.71
75	3	6246	6988	0.8938	1.1188	8463	1.2111	1.02	2.76
76	3.2	6259	6977	0.8971	1.1147	8451	1.2113	0.96	2.61
77	2.7	6250	6992	0.8939	1.1187	8451	1.2087	1.02	2.77
78	2.4	6278	7001	0.8967	1.1152	8475	1.2105	0.97	2.65
79	3.9	6283	7004	0.8971	1.1148	8478	1.2105	0.97	2.64
80	2.6	6279	7027	0.8936	1.1191	8490	1.2082	1.04	2.83
81	2.5	6264	6993	0.8958	1.1164	8478	1.2124	0.98	2.67
82	2.7	6264	6997	0.8952	1.1170	8470	1.2105	1.00	2.71
83	2.8	6253	6975	0.8965	1.1155	8445	1.2108	0.97	2.63
84	2.9	6237	6986	0.8928	1.1201	8446	1.2090	1.03	2.82
85	2.6	6244	6981	0.8944	1.1180	8421	1.2063	1.01	2.75
86	2.9	6265	7000	0.8950	1.1173	8465	1.2093	1.00	2.73
87	3	6257	6982	0.8962	1.1159	8458	1.2114	0.97	2.65
88	2.7	6243	6984	0.8939	1.1187	8450	1.2099	1.01	2.76
89	3.1	6289	7023	0.8955	1.1167	8494	1.2095	1.00	2.73
90	3	6295	7027	0.8958	1.1163	8490	1.2082	1.00	2.72
91	2.7	6307	7057	0.8937	1.1189	8517	1.2069	1.05	2.86
92	3	6308	7057	0.8939	1.1187	8525	1.2080	1.05	2.85
93	2.6	6306	7066	0.8924	1.1205	8515	1.2051	1.08	2.94
94	3.1	6272	7010	0.8947	1.1177	8504	1.2131	1.01	2.73
95	2.9	6256	7010	0.8924	1.1205	8479	1.2096	1.05	2.86
96	2.9	6246	6987	0.8939	1.1186	8468	1.2120	1.01	2.75
97	3.1	6259	7001	0.8940	1.1185	8484	1.2118	1.02	2.76
98	2.7	6258	7013	0.8923	1.1206	8496	1.2115	1.05	2.85
99	3	6262	6999	0.8947	1.1177	8488	1.2127	1.00	2.72
100	2.6	6296	7043	0.8939	1.1186	8504	1.2074	1.04	2.83
101	2.7	6269	6998	0.8958	1.1163	8476	1.2112	0.99	2.68
102	2.8	6248	6996	0.8931	1.1197	8478	1.2118	1.03	2.80
103	3.4	6261	7004	0.8939	1.1187	8460	1.2079	1.03	2.79
104	2.7	6285	7037	0.8931	1.1196	8507	1.2089	1.05	2.86
105	2.4	6365	7105	0.8958	1.1163	8527	1.2001	1.04	2.84
106	3.2	6263	7002	0.8945	1.1180	8476	1.2105	1.01	2.75
107	2.6	6253	6997	0.8937	1.1190	8482	1.2122	1.02	2.77
108	3.3	6260	7005	0.8936	1.1190	8462	1.2080	1.03	2.80
109	3	6261	7009	0.8933	1.1195	8479	1.2097	1.03	2.81
110	2.9	6292	7035	0.8944	1.1181	8514	1.2102	1.03	2.79
111	2.9	6317	7038	0.8976	1.1141	8513	1.2096	0.98	2.66
112	2.9	6290	7031	0.8946	1.1178	8508	1.2101	1.02	2.77

№	Прозр	4к	3к	4/3	3/4	2к	2/3	Восстан Ln	восстан. значения прозрачности
113	2.9	6326	7068	0.8950	1.1173	8519	1.2053	1.04	2.82
114	2.6	6289	7039	0.8935	1.1193	8511	1.2091	1.04	2.84
115	2.8	6266	7023	0.8922	1.1208	8485	1.2082	1.06	2.89
116	2.7	6261	6983	0.8966	1.1153	8474	1.2135	0.96	2.62
117	3	6254	6969	0.8974	1.1143	8447	1.2121	0.95	2.58
118	3.1	6255	6996	0.8941	1.1185	8473	1.2111	1.01	2.76
119	2.7	6269	7001	0.8954	1.1168	8486	1.2121	0.99	2.70
120	2.8	6244	6988	0.8935	1.1192	8437	1.2074	1.03	2.79
121	3.5	6291	7016	0.8967	1.1152	8466	1.2067	0.99	2.68
122	3.4	6243	6982	0.8942	1.1184	8445	1.2095	1.01	2.75
123	2.7	6256	6980	0.8963	1.1157	8429	1.2076	0.98	2.66
124	3.7	6238	6990	0.8924	1.1206	8450	1.2089	1.04	2.84
125	2.5	6240	6990	0.8927	1.1202	8436	1.2069	1.04	2.83
126	2.5	6254	6984	0.8955	1.1167	8448	1.2096	0.99	2.69
127	2.5	6254	6976	0.8965	1.1154	8436	1.2093	0.97	2.64
128	2.9	6241	6990	0.8928	1.1200	8460	1.2103	1.03	2.81
129	2.7	6248	6992	0.8936	1.1191	8432	1.2059	1.03	2.80
130	2.5	6300	7033	0.8958	1.1163	8493	1.2076	1.01	2.74
131	2.7	6640	7344	0.9041	1.1060	8664	1.1797	1.03	2.81
132	2.8	6424	7168	0.8962	1.1158	8563	1.1946	1.07	2.92
133	3.1	6328	7062	0.8961	1.1160	8533	1.2083	1.01	2.75
134	3.4	6278	7003	0.8965	1.1155	8479	1.2108	0.98	2.66
135	3.1	6285	7040	0.8928	1.1201	8513	1.2092	1.06	2.88
136	2.4	6294	7049	0.8929	1.1200	8493	1.2049	1.06	2.90
137	2.3	6370	7100	0.8972	1.1146	8517	1.1996	1.02	2.78
138	2.1	6391	7107	0.8993	1.1120	8506	1.1968	1.00	2.71
139	2.4	6381	7132	0.8947	1.1177	8551	1.1990	1.08	2.93
140	2.7	6339	7090	0.8941	1.1185	8528	1.2028	1.06	2.90
141	2.5	6322	7092	0.8914	1.1218	8525	1.2021	1.11	3.04

## Список использованных источников

1. Атлас Ладожского озера
2. Монография Ладога
3. Поздняков Д.В., Коросов А.А., Петрова Н.А., Петтерссон Л.Х., Грассл Х. Исследование «гистерезисного» характера возвращения Ладожского озера из мезотрофного состояния 2009 г.
4. РД 52.24.496-2018: Методика измерений температуры, прозрачности и определения запаха воды
5. Науменко М.А. Пространственное распределение и многолетние тренды прозрачности воды Ладожского озера.
6. Электронный ресурс <https://www.researchgate.net/>
7. Электронный ресурс <https://ru.wikipedia.org/wiki/Landsat-8>
8. Электронный ресурс <https://www.hmong.press/wiki/Sentinel-2>
9. Электронный ресурс <http://geomatica.ru/clauses/130/>
10. Электронный ресурс [https://vk.com/away.php?to=https%3A%2F%2Fscihub.copernicus.eu%2Fdhus%2F%23%2Fhome&cc\\_key](https://vk.com/away.php?to=https%3A%2F%2Fscihub.copernicus.eu%2Fdhus%2F%23%2Fhome&cc_key)
11. Электронный ресурс <https://earthexplorer.usgs.gov/>
12. О.А. Тихомиров , А.В. Бочаров , А.Б. Комиссаров , С.Д. Хижняк , П.М. Пахомов. «Использование данных сенсора landsat 8 (oli) для оценки показателей мутности, цветности и содержания хлорофилла в воде Иваньковского водохранилища»
13. Fuller L.M., Jodoin R.S., Minnerick R. Predicting lake trophic state by relating Secchi-disk transparency measurements to Landsat-satellite imagery for Michigan inland lakes, 2003–05 and 2007–08 / USGS Scientific Investigations Report 2011 – 5007. – U.S. Geological Survey, 2011
14. Mohsin J.B., Majid N. Landsat ETM+ Secchi Disc Transparency (SDT) retrievals for Rawal Lake, Pakistan / Advances in Space Research. – 2015. – Vol. 56, Issue 7.

15. [https://www.researchgate.net/publication/45718377\\_Use\\_of\\_Remote\\_Sensing\\_and\\_GIS\\_in\\_Monitoring\\_Water\\_Quality](https://www.researchgate.net/publication/45718377_Use_of_Remote_Sensing_and_GIS_in_Monitoring_Water_Quality)
16. Bricaud, A., Morel, A., and Prieur, L. (1981). Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains. *Limnology and Oceanograph*, 1, 43-53.
17. Mohd. Hasmadi Ismail and Kamaruzaman Jusoff. (1999). Preliminary mapping of water turbidity in Langat and Semenyih dam using satellite remote sensing data. Paper Presented at Malaysian Science & Technology Congress 1999, 8-10 November 1999, Hilton Hotel, Kuching, Sarawak, Malaysia.
18. Ritchie, J.C and Schiebe, F.R. (2000). Water qu In: G.A. Schultz and E.T. Engman (eds.), *Remote sensing in hydrology and water management*, Springer-Verlag, Berlin: Germany, 287-303; 351-352
19. Baban, S.M .J. (1993). Detecting water quality parameter in Norfolk Broads, U.K. using Landsat imagery, *Int. J. Remote Sensing*, 14, 1247-1267
20. MatJafri, M.Z., Abdullah, K., and Lim, H.S. (2001). Malaysia Tiungsat-1 imagery for water quality mapping. *GISdevelopment*. [Online] Available: <http://www.gisdevelopment.net/application/nrml> (Mac 5, 2010).