



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра инженерной гидрологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(бакалаврская работа)

На тему Применение ДЗЗ для оценки  
морфометрических  
характеристик озер

Исполнитель Морозов Александр Кириллович  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель К.Г.Н., доцент  
(ученая степень, ученое звание)

Сикан Александр Владимирович  
(фамилия, имя, отчество)

Консультант \_\_\_\_\_  
(ученая степень, ученое звание)

Винокуров Игорь Олегович  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
Заведующий кафедрой

(подпись)

К.Г.Н., доцент  
(ученая степень, ученое звание)

Хаустов Виталий Александрович  
(фамилия, имя, отчество)

«56» 06 2022г.

Санкт-Петербург  
2022

## Оглавление

Введение.....	3
1 Физико-географическое и климатическое описание района.....	4
1.1 Рельеф.....	5
1.2 Геологическое строение .....	6
1.3 Почвенный покров .....	7
1.4 Растительность .....	8
1.5 Климат.....	9
2 Описание объектов исследования .....	10
2.1 Описание озер и постов.....	13
3 Методика расчета.....	22
4 Определение взаимосвязи между площадью зеркала и уровнем воды в озере.....	28
4.1 Построение графиков связи $H = f(F_0)$ .....	28
4.2 Надежность уравнения регрессии .....	39
4.3 Проверка уравнений регрессии на независимом материале .....	41
Заключение .....	43
Список использованных источников .....	44

## Введение

Для практического использования водоемов необходимо знать их морфометрические характеристики, т.е. их размеры, форму котловин, размеры площадей водной поверхности и водосбора. Все эти параметры разделяются на показатели поверхности водоема, показатели его котловины и показатели всей озерной системы.

Конечно же, основной характеристикой поверхности являются размеры озера, его площадь. Она отражает плановые размеры водоема и используется для различных расчетов, например, для определения колебаний уровня воды и изменение ее запасов в водоеме, также можно использовать для расчета испарения с поверхности воды и т.п. Для этих целей измеряется только площадь водной поверхности, иными словами, площадь зеркала.

Существующие зависимости между уровнем воды и площадью зеркала, их же еще называют батиграфическими кривыми, позволяют оценить площадь зеркала для любого уровня. Такие кривые имеют большое практическое значение и используются при различного рода расчетах эффективности водохозяйственных мероприятий, связанных с изменением уровня воды в озере [1, 2].

Актуальность применения дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обусловлена невозможностью производить по ряду причин, например, географических или экономических, постоянные наблюдения и контроль состояния на различных водных объектах. В связи с этим для изучения того или иного объекта применяют данные дистанционного зондирования Земли. Спутниковые снимки могут обеспечить необходимым набором данных, которые наделены определенными свойствами (пространственными, спектральными и временными). Кроме того, используя космические снимки, можно получить информацию как на большие по площади, так и на труднодоступные участки.

## 1 Физико-географическое и климатическое описание района

Для определения зависимостей между уровнем воды и площадью зеркала по ряду озер был выбран следующий район исследования – Северо-Запад России, а именно Республика Карелия и Ленинградская и Новгородская области.



Рисунок 1 – Район исследования.

## 1.1 Рельеф

По характеру геологического и геоморфологического строения территория разделяется на две области: Северо-Запад и Карелию.

Карелия в основном характеризуется холмисто-равнинным рельефом с абсолютными отметками, не превышающими 200 м над уровнем моря. На северо-западе и западе отдельные массивы достигают высоты 350 – 600 м.

Частая смена гряд и холмов различного рода понижениями придает поверхности Карелии чрезвычайно расчлененный характер, несмотря на сравнительно малые относительные высоты. Для южных районов республики характерна северо-западная ориентировка форм рельефа, для северных – преимущественно широтная, реже северо-восточная и северо-западная.

С запада и северо-запада местность в целом понижается по направлению к трем крупным водным бассейнам, где наблюдаются наименьшие абсолютные отметки: у Онежского озера – до 40 м, у Белого моря – до 10 – 20 м, у Ладожского озера – до 5 – 10 м.

Территория Северо-Запада по характеру рельефа отчетливо разделяется на две части: 1) северо-западную – низменную и 2) восточную, юго-восточную и южную – возвышенную. Северо-западная часть расположена в основном в пределах Прибалтийской низменности, уходящей на западе на территорию Эстонии и Латвии, а на севере и северо-востоке – в Карелию.

Прибалтийская низменность – довольно однообразная слабоволнистая равнина, на которой отчетливо выделяется ряд возвышенностей и понижений. Абсолютные отметки поверхности в среднем составляют 50 – 100 м, однако наиболее значительные возвышенности достигают 200 – 300 м. К ним относятся: возвышенность в центральной части Карельского перешейка, Силурийское плато в центральной части Ленинградской области, Лужская возвышенность, расположенная к северо-востоку от г. Пскова, Судомская – к югу от г. Порхова и Бежаницкая – к югу от г. Новоржева [3].

## 1.2 Геологическое строение

В геологическом отношении территория Карелии является восточной частью Балтийского кристаллического щита и представляет собой область распространения преимущественно древнейших кристаллических пород архейско-протерозойского комплекса.

Древнейшие архейские и протерозойские образования в Карелии представлены изверженными и обломочно-осадочными породами, метаморфизованными в толщу кристаллических сланцев. Они имеют преимущественно северо-западное простирание. Развита по побережью Белого моря, в бассейнах рек Керести, Гридины, Поньгомы и в нижнем течении р. Кеми.

Молодые архейские образования представлены огнейсованными гранитами, гранно-диоритами и магматитами, объединенными под общим названием гнейсо-гранитов. Они широко развиты в бассейнах рек Тумчи, Кеми, Чирко-Кеми, Выга, Сегежи, Шуи и в верхнем течении р. Водлы.

Породы протерозойского возраста распространены к северо-западу от Онежского озера, протягиваясь полосой до озер Куйто, а также к северо-западу от Ладоского озера. В составе протерозоя выделяются нижняя и верхняя подгруппы.

Кристаллические породы и осадки палеозоя покрыты плащом четвертичных отложений, из-под которого нередко выходят на поверхность подстилающие коренные породы. Четвертичные отложения представлены слонным комплексом ледниковых отложений (глинистые и песчано-валунные морены, ленточные глины, озовые и камовые пески и супеси), морских песчано-глинистых отложений межледникового и послеледникового времени, озерно-аллювиальных и болотных отложений (торфяников).

Территория Северо-Запада расположена почти целиком в пределах Русской платформы и сложена комплексом осадочных дочетвертичных

отложений, залегающих под четвертичными на архейском или протерозойском кристаллическом основании.

Осадочные коренные образования области представлены преимущественно отложениями палеозоя: толщами нижнего кембрия, нижнего, среднего и верхнего ордовика, среднего и верхнего девона, нижнего и среднего карбона.

Палеозойские осадочными породы повсеместно перекрыты толщей четвертичных отложений, мощность которых варьирует в больших пределах (0.5 – 200 м). Эти отложения представлены комплексом ледниковых и послеледниковых образований. Самыми древними из них являются московская морена и сопровождающие ее водно-ледниковые осадки. Выше залегает комплекс позднеледниковых песчаных флювиогляциальных и озерно-ледниковых песчано-глинистых отложений. Заканчивается разрез четвертичной толщи послеледниковыми и современными отложениями. Это обычно покровные образования: озерные, морские песчано-глинистые отложения, аллювиальные наносы, торфяники, эоловые (дюнные) пески [3].

### 1.3 Почвенный покров

Основными процессами почвообразования на территории Карелии и Северо-Запада являются подзообразование и заболачивание, что обусловлено положением территории в зоне с холодным, влажным климатом, а также преобладанием лесной, преимущественно хвойной растительности. По характеру почвообразования территория может быть разделена на две зоны: северную и южную. Граница между ними проходит примерно на широте Ладожского и Онежского озер.

В северо-западной части Карелии по механическому составу большая часть почв отличается высоким содержанием относительно крупных невыветрившихся обломков кристаллических пород.

В южной части Карелии по механическому составу почвы отличаются большим разнообразием и содержат меньше грубых элементов и относительно богаче фракциями песчано-пылевых частиц.

На Онежско-Ладожском водоразделе преобладают слабоподзолистые почвы, развитые на суглинистых и супесчаных породах. На Восточно-Онежской равнине преобладают суглинистые и песчано-пылеватые почвы.

В Новгородской области наибольшее распространение имеют дерново-подзолистые и все разновидности подзолистых почв [3].

#### 1.4 Растительность

Рассматриваемая территория расположена преимущественно в пределах таежной зоны. Карелию пересекают две широтные полосы этой зоны: северотаежная и среднетаежная. Граница этих полос совпадает с границей почвенных подзон и проходит примерно по 63° с.ш.

Таежные полосы представлены следующими типами растительности:

1. Еловые леса – на возвышенно-равнинных участках с супесчаными и суглинистыми подзолистыми почвами, в долинах рек и ручьев и по окраинам сфагновых болот с торфяно-подзолистыми почвами;
2. Сосновые леса – на дренированных возвышенных участках с песчаными и песчано-каменистыми подзолистыми почвами и в замкнутых низинах с торфяно-болотными почвами;
3. Сфагновые торвяно-осоковые и кустарничковые болота совершенно необлесенные или с редкостойной сосной.

Распределение растительности по территории определяется климатом, рельефом, почвогрунтовыми условиями и фитоценоотическими взаимоотношениями растений. Господствующим типом растительности являются леса, состоящие преимущественно из хвойных пород – сосны и ели.



Территория Северо-Запада расположена в основном в южной подзоне тайги; лишь небольшая северо-восточная часть ее находится в подзоне средней тайги, а крайняя юго-западная – в зоне смешанных лесов.

Наиболее характерны темнохвойные (еловые) леса. Они приурочены к водоразделам с суглинистыми и частично супесчаными почвами.

На более легких песчаных и супесчаных почвах широко распространены сосновые леса, образующие такие же сообщества, как и еловые.

Состав лиственных лесов представлен главным образом мелколиственными породами (березой, осиной, ольхой). На юго-западе значительна примесь широколиственных пород (липы, клена, дуба, ясеня, вяза) [3].

## 1.5 Климат

Климат Северо-Запада умеренно континентальный, с чертами морского. Характеризуется продолжительной мягкой зимой и коротким прохладным летом, значительной облачностью и неустойчивой погодой в течение всего года. Наиболее существенное значение для формирования гидрографической сети и гидрологического режима водных объектов имеют атмосферные осадки, испарение и их соотношение. Рассматриваемая территория относится к зоне избыточного увлажнения, что определяется сравнительно небольшим приходом тепла и хорошо развитой циклонической деятельностью во все сезоны. Количество осадков составляет 550 – 750 мм в среднем за год, возрастает с севера на юг. В то же время вследствие невысоких летних температур, большой облачности, повышенной влажности воздуха Северо-Запад является зоной относительно малого испарения, составляющего в среднем за год 310 мм на севере и 420 мм на юге. Таким образом, испаряется только 50 – 60% осадков, остальная часть идет на формирование речного стока [4].

## 2 Описание объектов исследования

В качестве объектов исследования были выбраны следующие озера:

1. оз. Пелено – д. Спасское;
2. оз. Сяберо – с. Сяберо;
3. оз. Коробожа – с. Устрека;
4. оз. Шугозеро – д. Ульяница;
5. оз. Лексозеро – с. Реболы;
6. оз. Ведлозеро – с. Ведлозеро;
7. оз. Тулмозеро – д. Колатсельга;
8. оз. Лендерское – пос. Лендеры;
9. оз. Суоярви – г. Суоярви.

Сведения о расположении озер на территории исследования приведено на рисунке 2, где отмечены все объекты, подлежащие анализу.

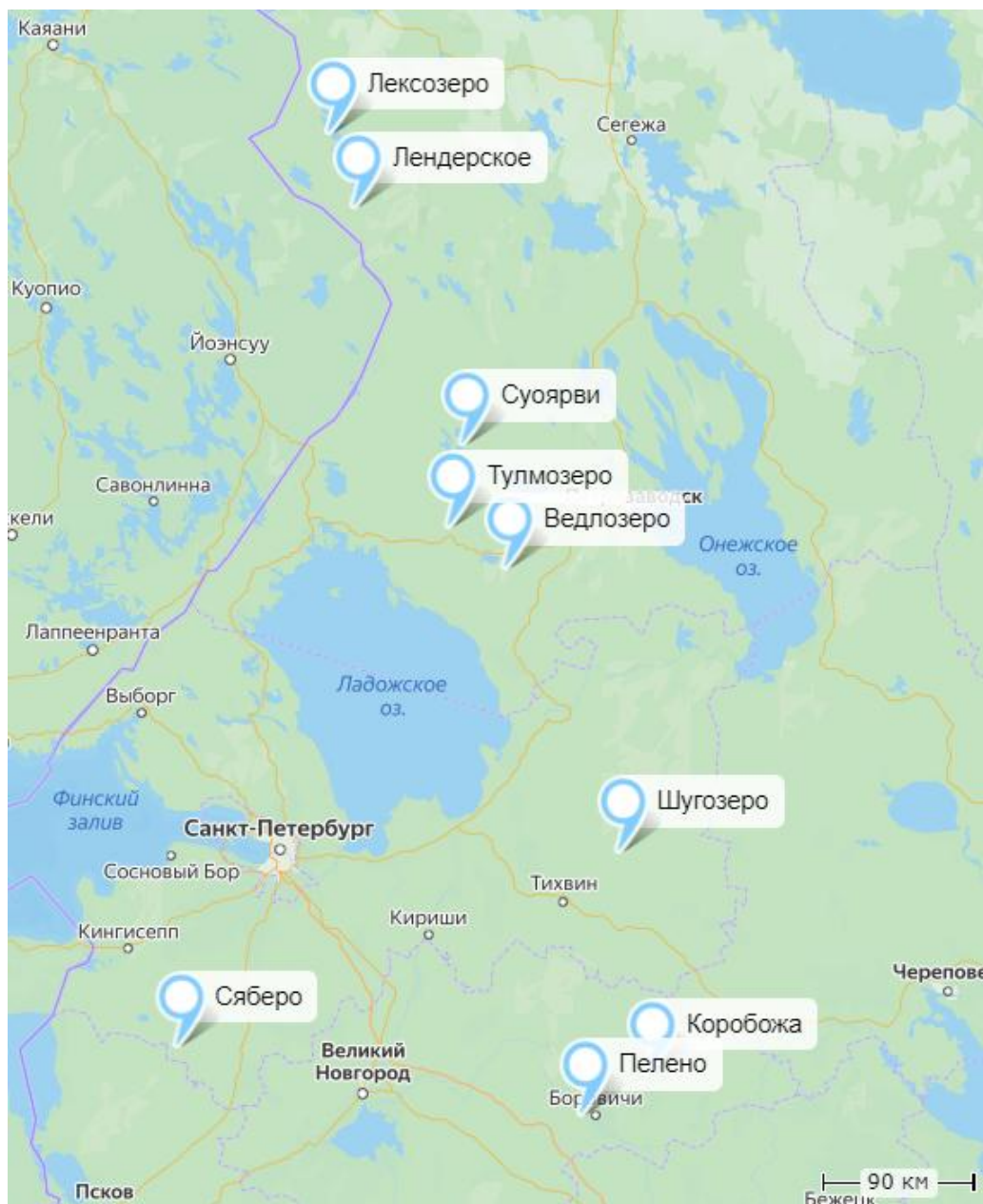


Рисунок 2 – Расположение озер на местности.

Озера, подлежащие исследованию, имеют ледниковое происхождение, форма котловин разная. Последняя в свою очередь оказывает существенное влияние на характер и направление течений, которые в свою очередь определяют перераспределение отложений в водоеме и его тепловой режим. При этом форма котловины также может влиять и на сроки вскрытия или замерзания [2].

Анализ условий формирования и распространения различных типов озерных котловин по территории России свидетельствует, что образование

озер, прежде всего, связано с геологическими и геоморфологическими процессами.

Известно, что Карелия является страной озер, т.к. 20% ее территории покрыто водными объектами. В гидрографическом отношении республика относится к бассейнам Белого и Балтийского морей, причем на балтийскую часть приходится 43% территории. Специфика гидрографии района обусловлена особенностями всего комплекса природных условий, в первую очередь геологического строения, рельефа и климата, а также географическим положением республики.

По происхождению в Карелии, как правило, выделяются два основных типа озерных котловин: тектонические и ледниковые (моренные). Почти все крупные и средние водоемы имеют изначально тектонический генезис. Их котловины развиты в трещинах и сбросах с ярко выраженными следами эрозионной деятельности ледников. Они имеют, как правило, сложные очертания берегов и пересеченный рельеф дна, большие глубины. Озера ледникового типа расположены в понижениях между моренными грядами и холмами или в подпруженных речных долинах. Они небольших размеров, имеют менее изрезанную, часто округлую форму, плоское дно без резких перепадов глубин, которые не превышают, как правило, 5 – 10 м. Также встречаются узкие длинные озера, через которые протекают реки. Кроме того, много мелких озер болотного происхождения.

Ряд озер и водохранилищ подвержены антропогенному воздействию в результате сброса в низ промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод, ливневых и дренажных вод, а также стоков с сельскохозяйственных угодий [4].

## 2.1 Описание озер и постов

1. оз. Лексозеро – с. Реболы. Пост располагается на северо-восточном берегу озера.

Котловина ледниково-тектонического генезиса. На озере – более 100 островов общей площадью 12.5 км<sup>2</sup>. В озеро впадают реки Колвас, Кюно, Хилькон, Пенига и 19 ручьев, вытекает р. Сула.

Прилегающая местность мелкохолмистая, местами заболоченная, в окрестностях села открытая, занятая огородами, пашнями, далее поросшая смешанным лесом. Грунты супесчаные и суглинистые, с валунами и выходами коренных пород. Береговая линия сильно изрезана. На участке поста берег крутой и обрывистый, высотой до 6 м, к урезу пологий, сложен песком. Дно озера песчано-каменистое, устойчивое. Заращение прибрежной зоны незначительное.

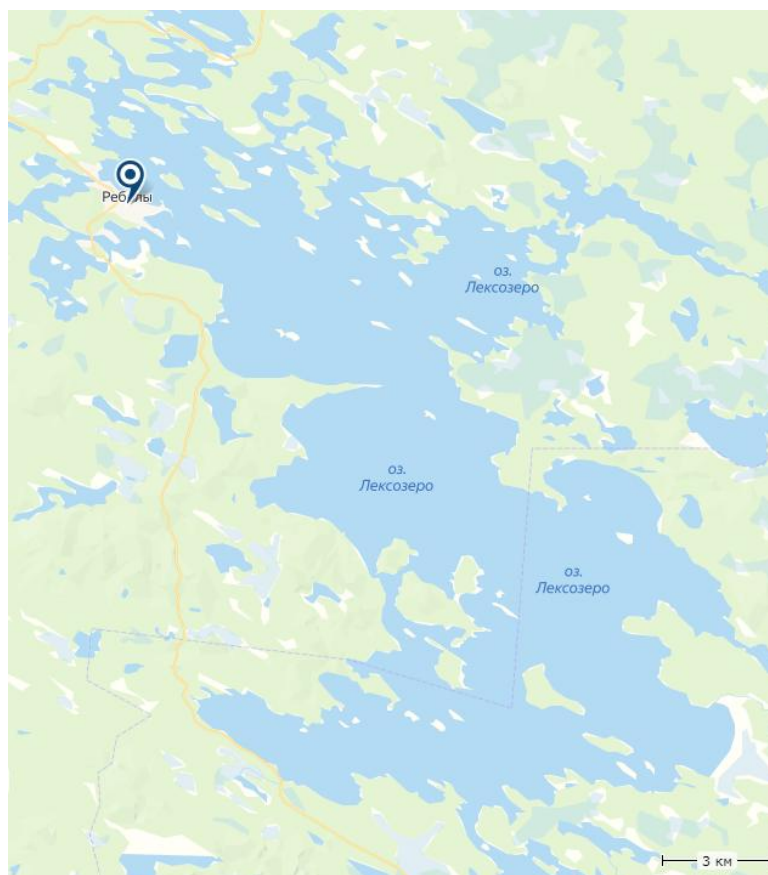


Рисунок 3 – Озеро Лексозеро – с. Реболы.

2. оз. Лендерское – пос. Лендеры. Пост находится на восточном берегу озера в 350 м к западу-северо-запада от моста через р. Лендерку.

Котловина ледникового происхождения. На озере – 8 островов общей площадью 0.4 км<sup>2</sup>. В озеро впадают реки Айтаеги, Малая Айтаеги, Лендерка, Войдома и 3 ручья, вытекает р. Лендерка.

Прилегающая местность среднехолмистая, поросшая смешанным лесом с преобладанием хвойных пород. Грунты песчано-каменистые. Берег озера на участке поста умеренно крутой, высотой 12 – 15 м.

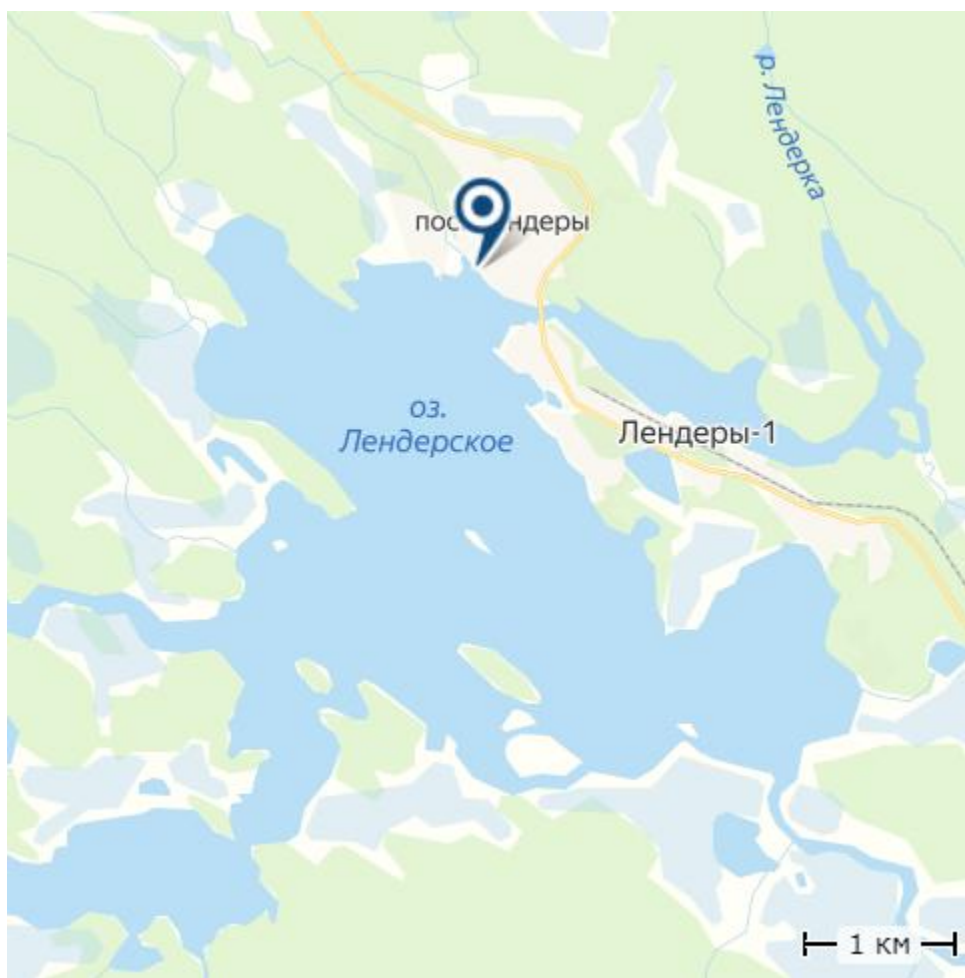


Рисунок 4 – Оз. Лендерское – пос. Лендеры.

3. оз. Тулмозеро – с. Колатсельга. Пост расположен в северо-западной части озера на правом берегу плеса устьевого участка р. Колос, в начале с. Колатсельга.

Прилегающая местность среднехолмистая, сложена песчано-каменистыми грунтами с выходом скальных пород, местами заболоченная. Берег озера каменисто-валунный, возвышенный, с пахотными землями и лугами. Дно озера песчано-каменистое, илистое.



Рисунок 5 – Оз. Тулмозеро – с. Колатсельга.

4. оз. Ведлозеро – с. Ведлозеро. Пост расположен на северо-восточном берегу озера, в селе.

Котловина ледникового происхождения. Общая площадь островов 6.1 км<sup>2</sup>. В озеро впадают реки Нялма, Вухтанеги и 18 ручьев, вытекает р. Видлица.

Прилегающая местность среднехолмистая, поросшая смешанным лесом. Склоны отдельных холмов заняты сельскохозяйственными угодьями, понижения между холмами заболочены. Грунты песчано-галечные. Берег озера у поста высокий 3 – 4 м, умеренно крутой, песчано-каменистый, поросший кустарником. Дно озера песчано-каменистое, местами илистое.



Рисунок 6 – Оз. Ведлозеро – с. Ведлозеро.



5. оз. Шугозеро – п. Ульяница. Пост расположен на восточном берегу озера, в 1 км югу от д. Ульяницы.

Окружающая местность, в основном, холмистая. К западу от поста – плоская равнина, занятая сельскохозяйственными угодьями, частично заболоченная, местами поросшая кустарником. Берега озера пологие, дно в прибрежной зоне песчано-каменистое, в глубинной – илистое.



Рисунок 7 – Оз. Шугозеро – п. Ульяница.

б. оз. Суоярви – г. Суоярви. Пост расположен на южном берегу озера, в 0.5 км от железнодорожной станции.

Котловина ледниково-тектонического происхождения. На озере – 50 островов общей площадью 4.9 км<sup>2</sup>. Основной приток – протока оз. Салонъярви, исток – р. Шуя.

Прилегающая местность мелкохолмистая, поросшая хвойным лесом, заболоченная. Грунты супесчаные и суглинистые, с выходом скальных пород. Берег озера в районе поста пологий. Дно песчано-илистое, незарастающее.

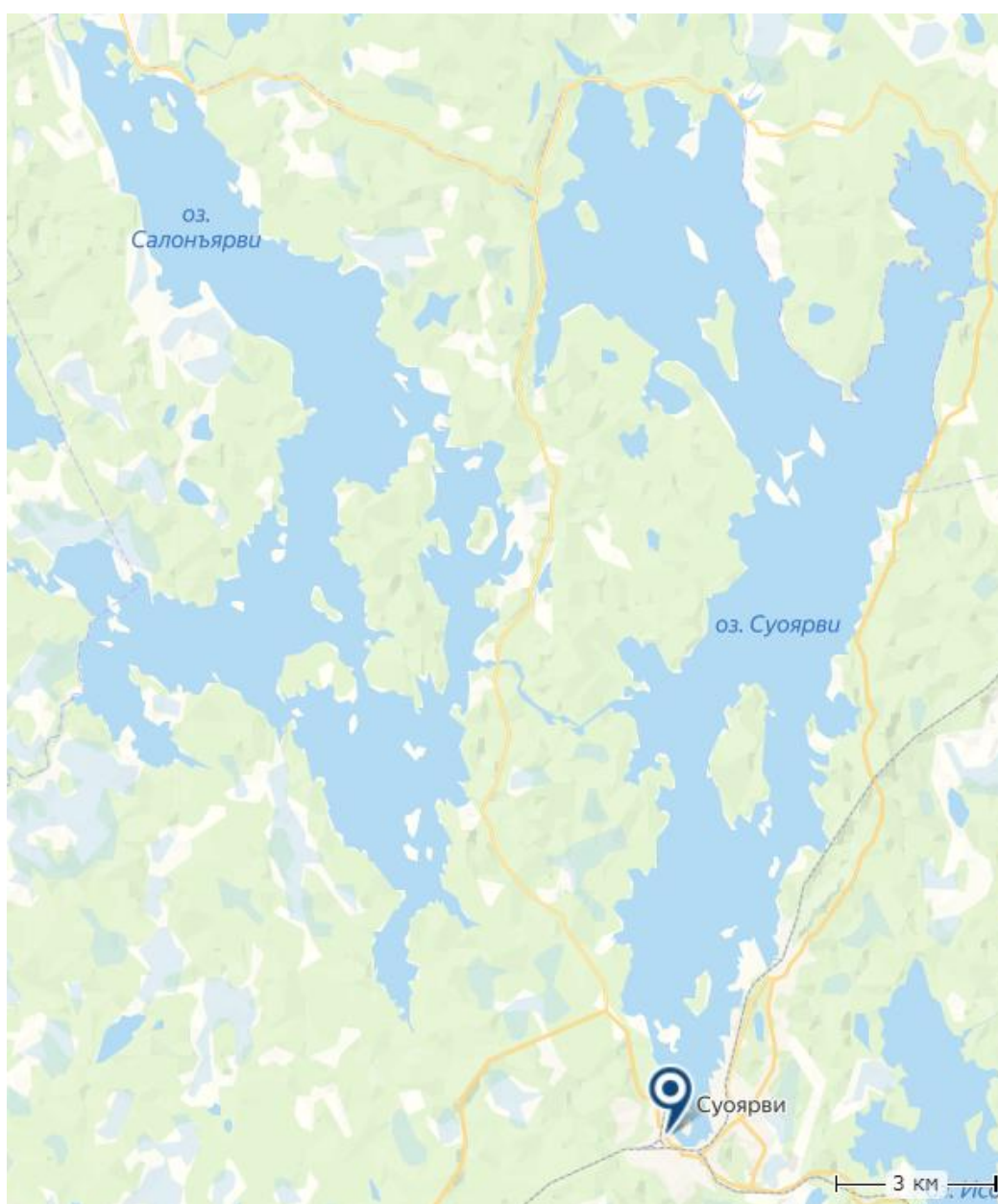


Рисунок 8 – Оз. Суоярви – г. Суоярви.

7. оз. Коробожа – с. Устрека. Пост находится на юго-восточном берегу озера, у истока р. Увери.

Прилегающая местность – слабохолмистая равнина, поросшая смешанным лесом, частично заболоченная, местами занятая сельскохозяйственными угодьями. Котловина озера ясно выражена, имеет вытянутую форму, высота склонов 6 – 8 м. Склоны пологие, песчаные, задернованные. Дно илистое, у берегов зарастает водной растительностью.

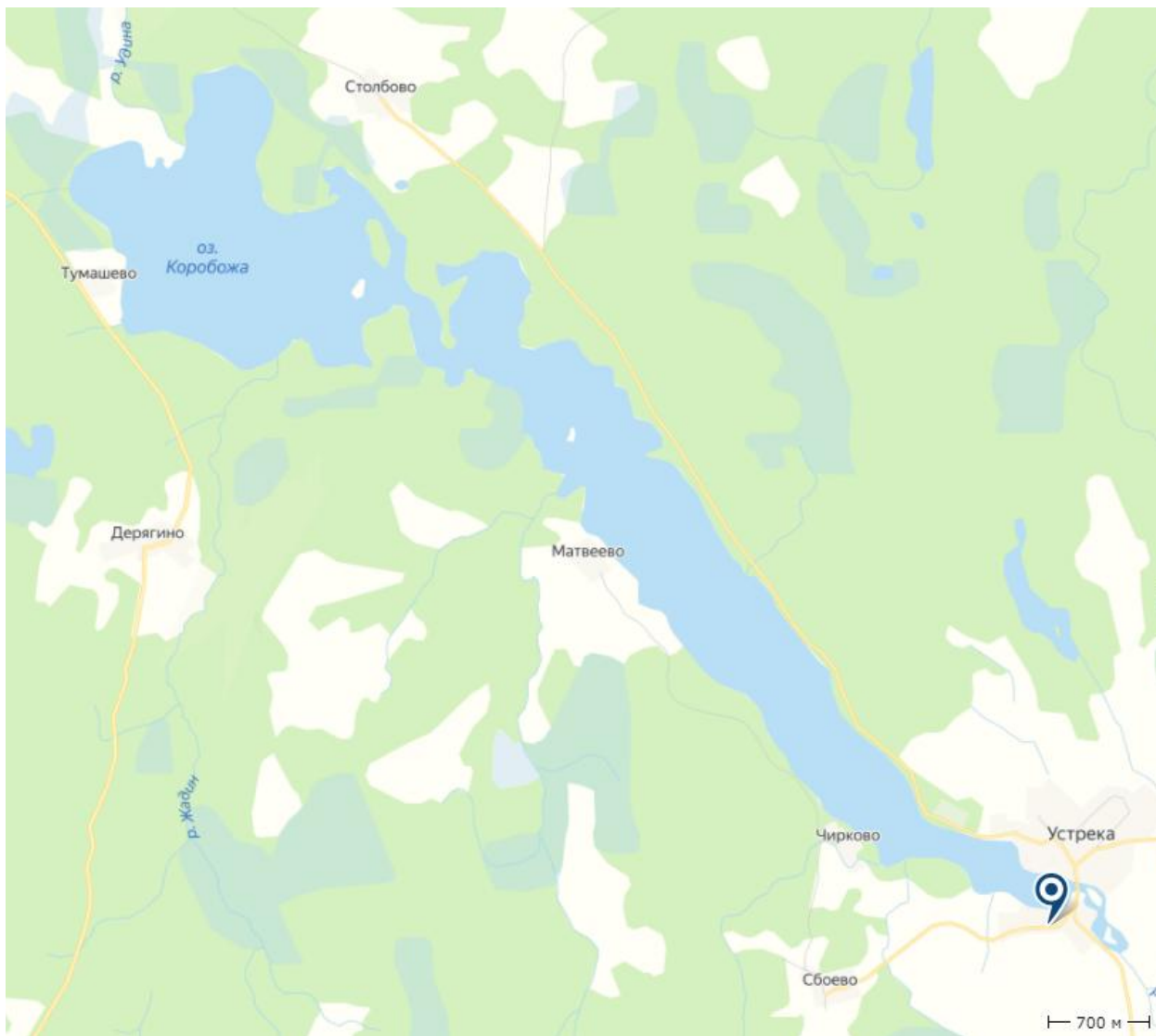


Рисунок 9 – Оз. Коробожа - с. Устрека.

8. оз. Пелено – д. Спасское. Пост находится на юго-восточном берегу озера. Окружающая местность – слабохолмистая равнина, поросшая смешанным лесом, частично заболоченна, местами занята сельскохозяйственными угодьями. Склоны озерной котловины пологие, высотой до 8 м. В районе поста берег обрывистый, высотой до 1 м. Дно илистое, у берегов песчаное с камнями, зарастающее водной растительностью.

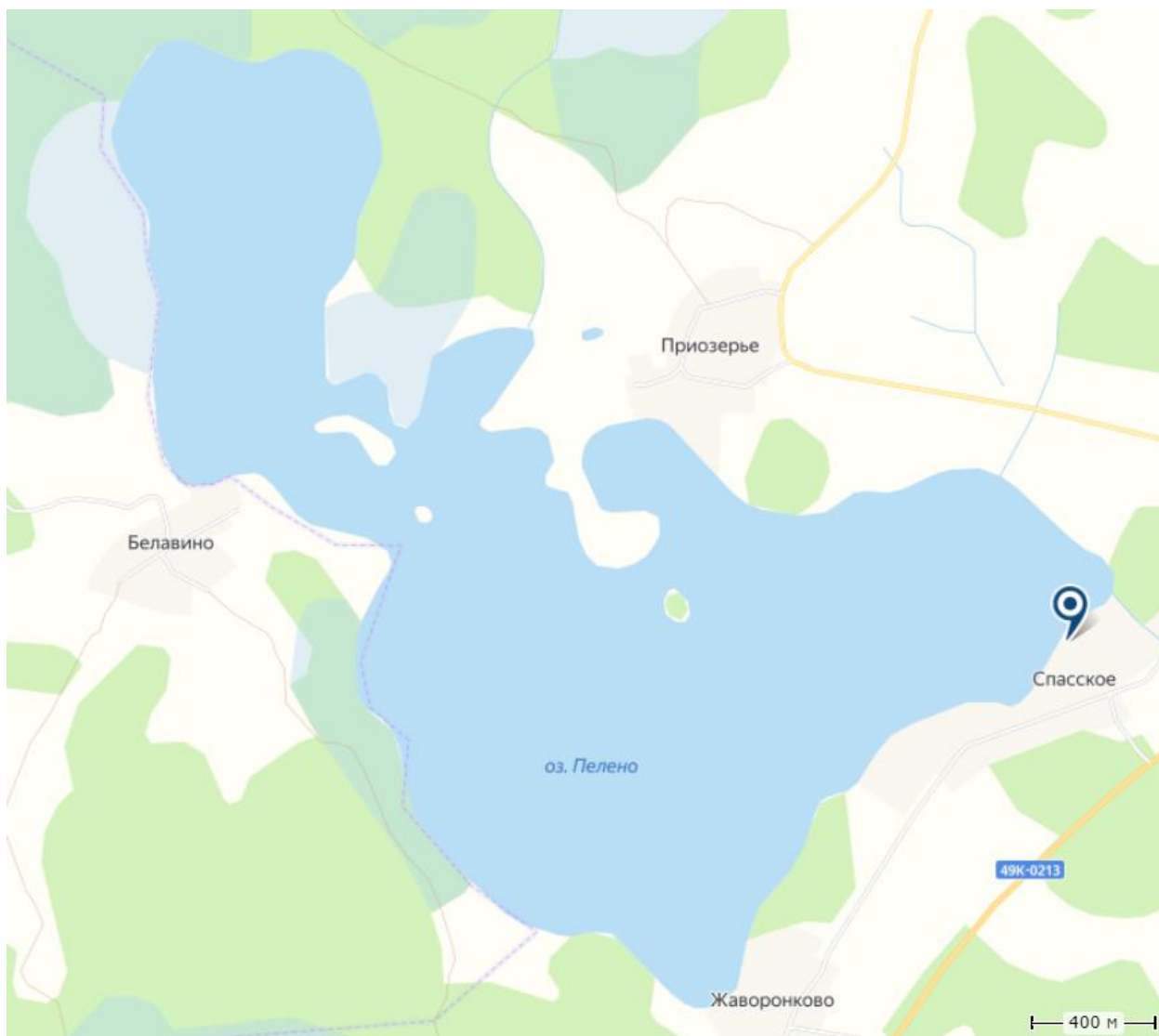


Рисунок 10 – Оз, Пелено – д. Спасское.

9. оз. Сяберо – д. Сяберо. Пост расположен на юго-восточном берегу озера на полуострове.

Прилегающая местность слабохолмистая, поросшая сосновым лесом, песчаная. Склоны озерной котловины умеренно крутые, высотой 10 – 15 м, поросшие лесом. Берега озера низкие, пологие, заболоченные. Деформации берегов не происходит. В районе поста дно песчаное, слегка заиленное, зарастает водной растительностью [5].

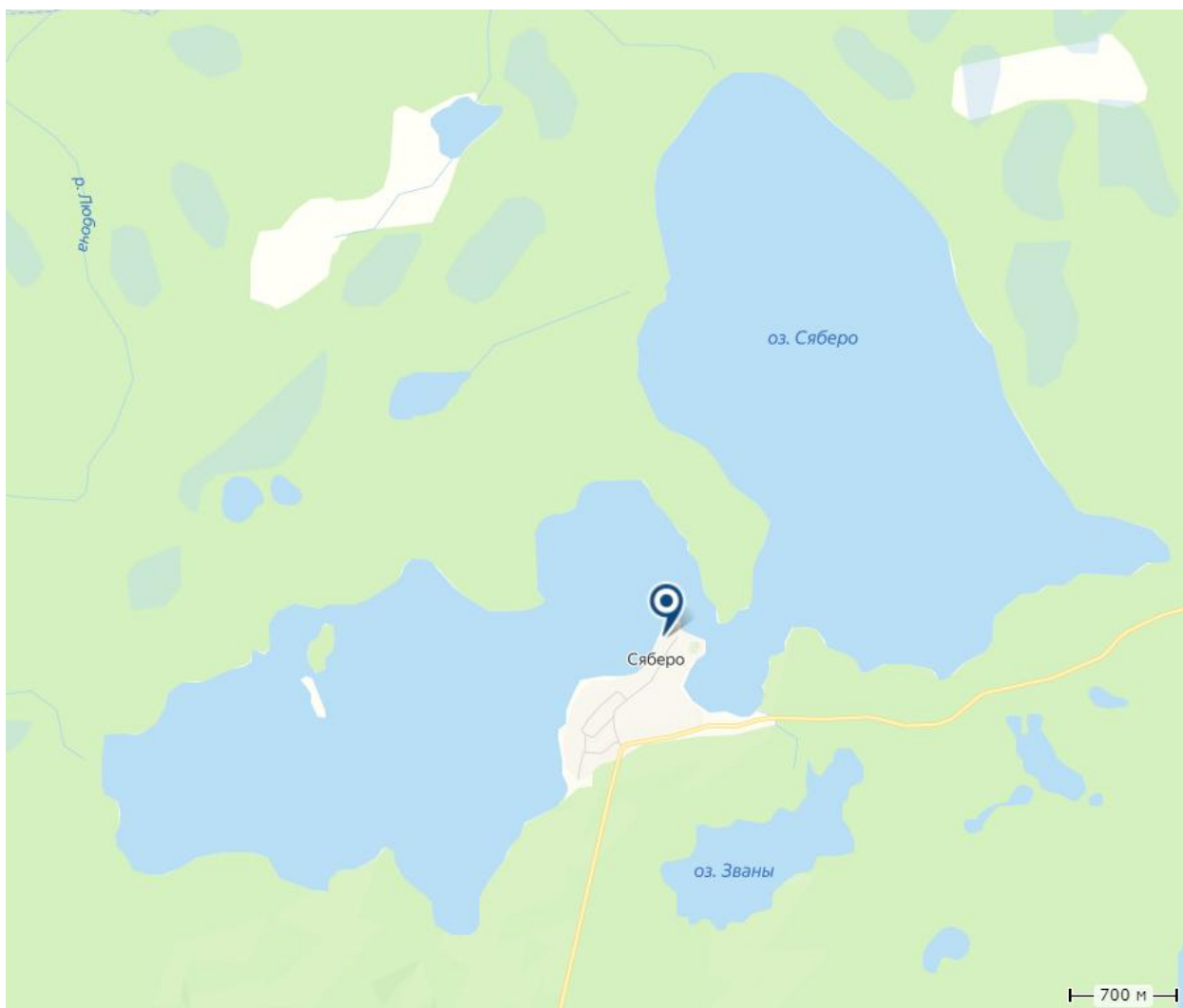


Рисунок 11 – Оз. Сяберо – д. Сяберо.

### 3 Методика расчета

При выполнении обработки массива данных для определения зависимости между уровнем воды и площадью зеркала  $H = f(F_0)$  были использованы материалы космического спутника Landsat 8 [6], а также уровни воды озера на конкретную дату, взятые с сайта Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) [7].

Landsat 8 – это сотрудничество между НАСА и Геологической службой США (USGS), обеспечивает измерения умеренного разрешения (15 – 100 м, в зависимости от спектральной частоты) наземных и полярных регионов Земли в видимом, ближнем инфракрасном, коротковолновом инфракрасном и тепловом инфракрасным излучением.

Спутник был запущен 11 февраля 2013 года.

Landsat 8 обеспечивает непрерывность работы с более чем 40-летним набором данных Landsat land imaging. В дополнение к широко распространенному регулярному использованию для планирования и мониторинга землепользования в региональном и местном масштабах, поддержки реагирования на стихийные бедствия и оценок, а также мониторинга водопользования, измерения Landsat 8 непосредственно служат исследованиям НАСА в основных областях климата, углеродного цикла, экосистем, водного цикла, биогеохимии и поверхности Земли.

Серия данных Landsat, начатая в 1972 году, является самой длинной непрерывной записью изменений поверхности Земли, видимой из космоса, и единственной спутниковой системой, разработанной и эксплуатируемой для многократного наблюдения глобальной поверхности земли с умеренным разрешением. Свободно доступные данные Landsat предоставляют уникальный ресурс для людей, которые работают в сельском хозяйстве,

геологии, лесном хозяйстве, региональном планировании, образовании, картографии и исследованиях глобальных изменений.

Полезная нагрузка спутника Landsat 8 из двух научных приборов – многоканального сканирующего радиометра (Operational Land Imager – OLI) и двухканального теплового инфракрасного датчика (TIRS). Эти два датчика обеспечивают сезонный охват глобальной суши с пространственным разрешением 30 метров (видимый, NIR, SWIR); 100 метров (тепловой); и 15 метров (панхроматический).

Размер снимка Landsat 8 составляет 185x180 км. Номинальная высота спутника 705 км.

Landsat 8 включает в себя эволюционные достижения в области технологий и производительности. OLI предоставляет два новых спектральных диапазона, один из которых специально разработан для обнаружения перистых облаков, а другой – для наблюдений в прибрежной зоне, а TIRS собирает данные для двух более узких спектральных диапазонов в термальной области, ранее покрытой одним широким спектральным диапазоном на Landsat 4-7 [8].

При полете на орбите спутник совершает более 400 снимков ежедневно – это намного больше, чем делали предыдущие спутники Landsat.

Landsat 8 сделал большой вклад в водное хозяйство. Принятые решения повлияли на миллионы людей во всем мире. Landsat позволяет принимать решения, которые непосредственно помогают людям, к примеру, в засушливых регионах с его помощью можно найти запасы воды. В нашем случае задачей является разработка методики определения уровня воды по площади зеркала водоема.

Лимитирующим фактором в обработке данных является недостаточность данных на АИС ГМВО – необходимую информацию можно получить только за период 2008 – 2019 гг. Помимо этого, до запуска спутника Landsat 8, т.е. до 2013 года, качество снимков заметно хуже, что не позволяет сделать качественный анализ имеющейся информации. Несмотря

на данные факторы, ряд данных получился достаточно полным, и по нему можно делать различные выводы.

Обработка данных производилась в программе ArcGIS. При комбинации необходимых каналов (7-6-4) были получены снимки (рисунок 12), приближенные к естественным цветам, позволяющие анализировать состояние атмосферы и поверхности земли. Растительность отображается в оттенках темно и светло зеленого, урбанизированные территории выглядят белыми, зелено-голубыми и малиновыми, почвы, песок и минералы могут быть очень разных цветов. Практически полное поглощение излучения в среднем ИК-диапазоне водой, снегом и льдом позволяет очень четко выделять береговую линию и подчеркнуть водные объекты на снимке[9].



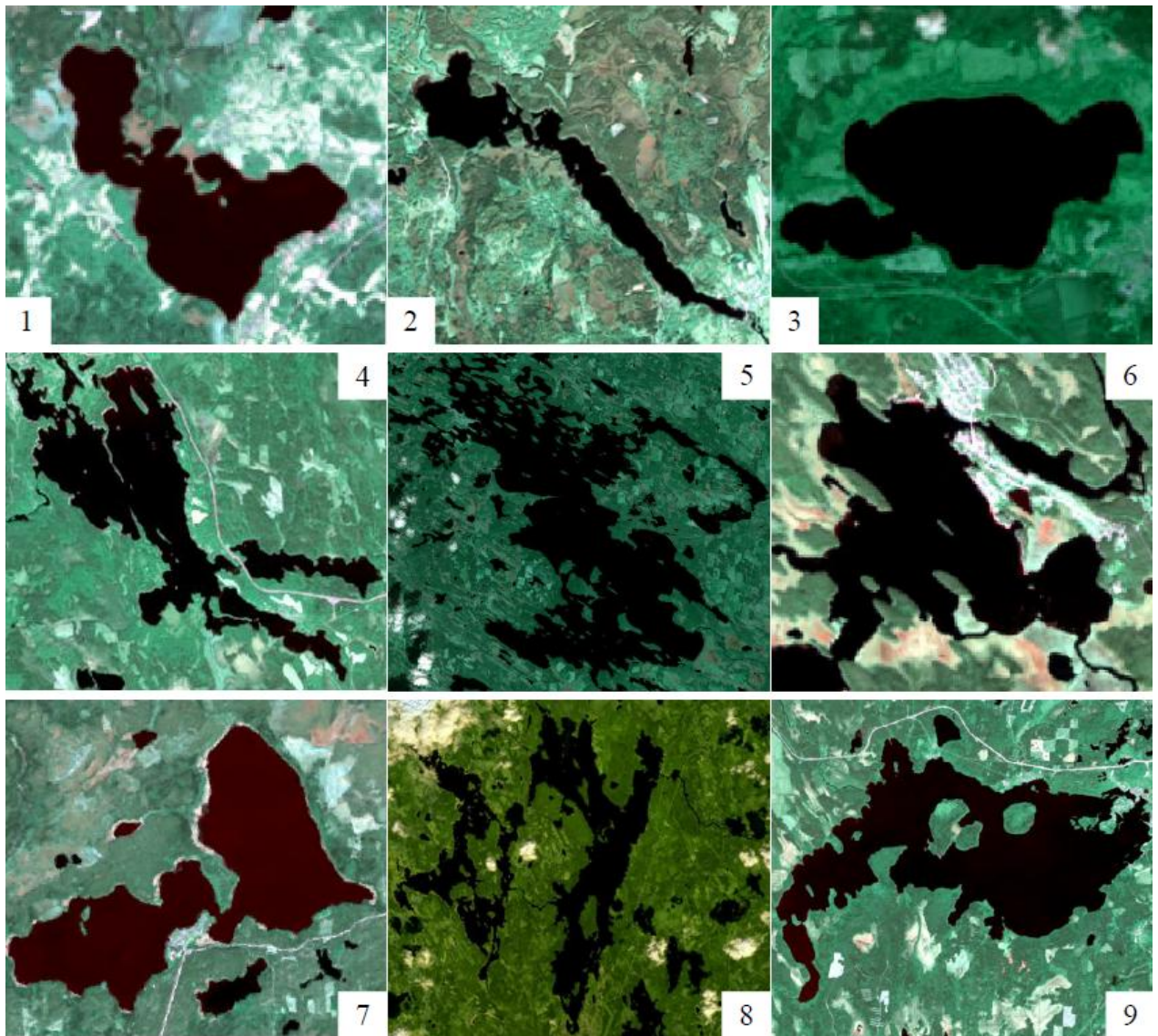


Рисунок 12 – Полученные снимки Landsat 8 после объединения каналов.  
1 – оз. Пелено, 10.05.2016; 2 – оз. Коробожа, 25.09.2017; 3 – оз. Шугозеро, 06.08.2013; 4 – оз. Тулмозеро, 17.07.2018; 5 – оз. Лексозеро, 29.05.2016; 6 – оз. Лендерское, 03.09.2013; 7 – оз. Сяберо, 17.05.2018; 8 – оз. Суоярви, 15.07.2018; 9 – оз. Ведлозеро, 17.07.2018.

Для создания обучающей выборки выделялись эталонные участки, разбитые на определенные группы, такие как водная поверхность, растительность, урбанизированные территории, облачность. Далее, используя классификацию по методу наибольшего правдоподобия (инструмент «Maximum Likelihood Classification»), на выходе был получен классифицированный растр (рисунок 13).

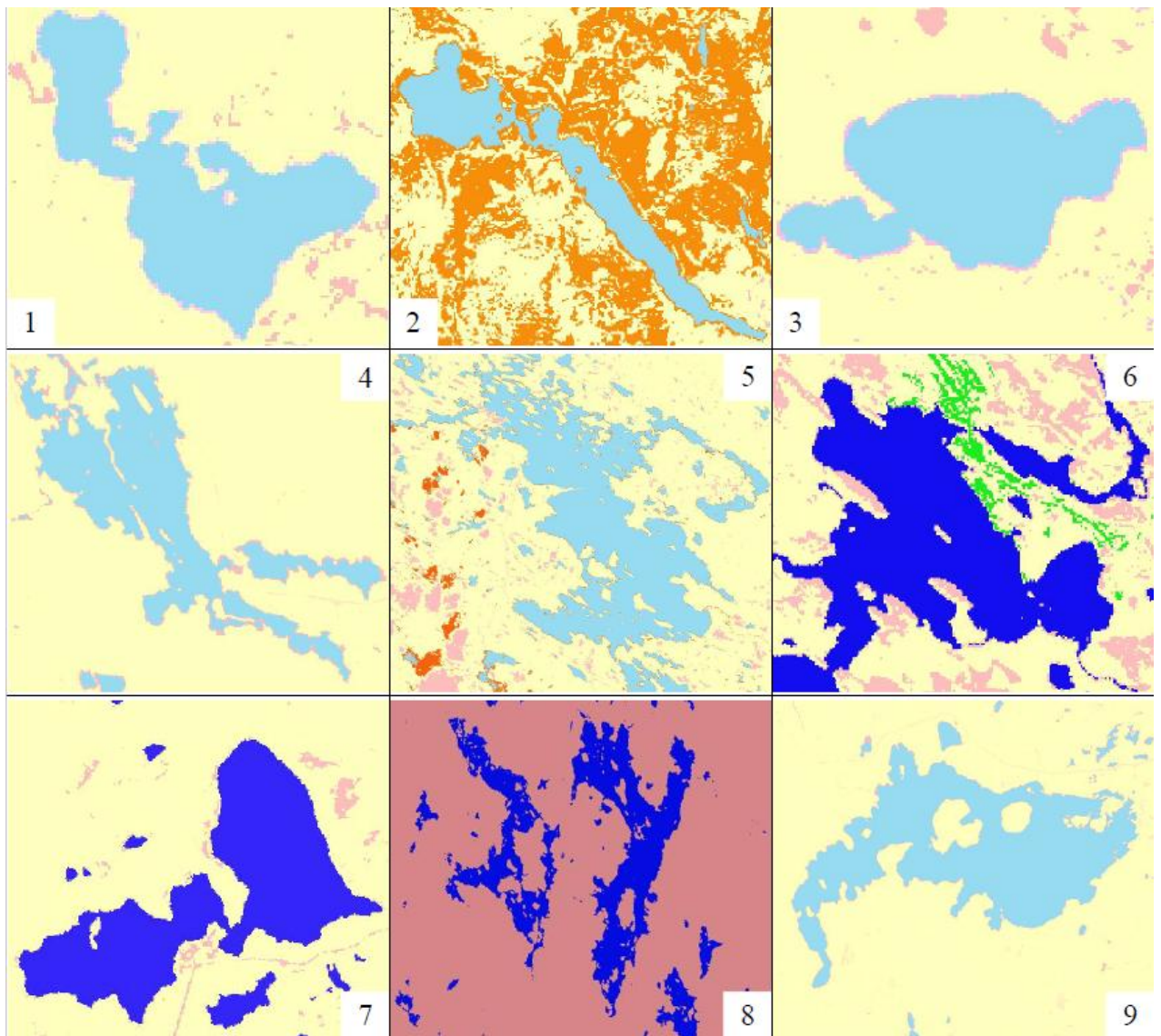


Рисунок 13 – Классифицированные растры по методу максимального правдоподобия.

1 – оз. Пелено, 10.05.2016; 2 – оз. Коробожа, 25.09.2017; 3 – оз. Шугозеро, 06.08.2013; 4 – оз. Тулмозеро, 17.07.2018; 5 – оз. Лексозеро, 29.05.2016; 6 – оз. Лендерское, 03.09.2013; 7 – оз. Сяберо, 17.05.2018; 8 – оз. Суоярви, 15.07.2018; 9 – оз. Ведлозеро, 17.07.2018.

Дальнейшая обработка растровых изображений заключается в преобразовании их в полигоны (рисунок 14) с последующим определением площадей водной поверхности. Для конвертации используется функция «Raster to Polygon».

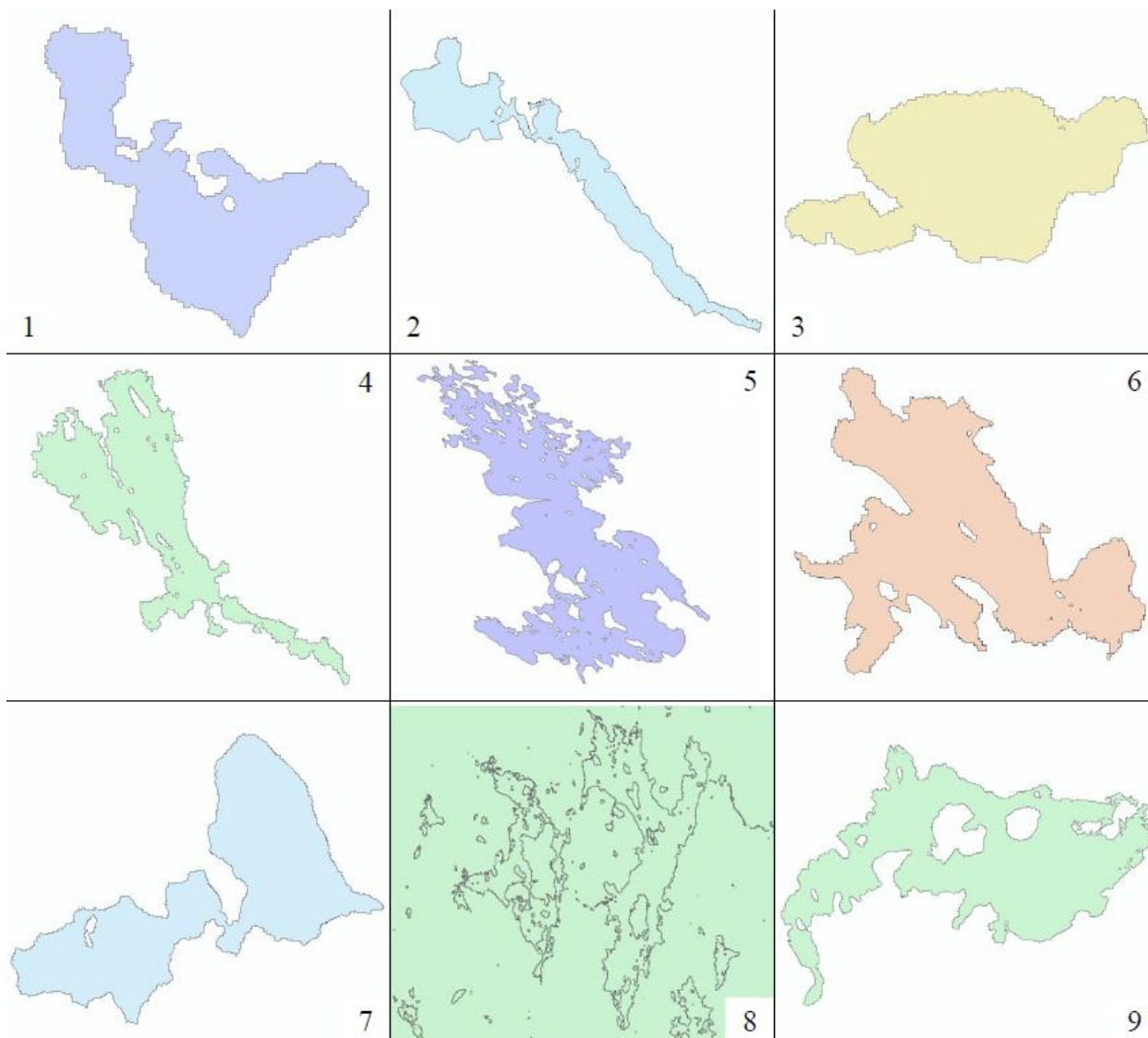


Рисунок 14 – Преобразованные в полигоны растровые изображения.

1 – оз. Пелено, 10.05.2016; 2 – оз. Коробожа, 25.09.2017; 3 – оз. Шугозеро, 06.08.2013; 4 – оз. Тулмозеро, 17.07.2018; 5 – оз. Лексозеро, 29.05.2016; 6 – оз. Лендерское, 03.09.2013; 7 – оз. Сяберо, 17.05.2018; 8 – оз. Суоярви, 15.07.2018; 9 – оз. Ведлозеро, 17.07.2018.

Непосредственно определение площади зеркала озера производится в атрибутивной таблице. Для этого необходимо добавить новое поле и задать ему имя. С помощью команды Calculate Geometry для выбранных объектов рассчитывается площадь.

#### 4 Определение взаимосвязи между площадью зеркала и уровнем воды в озере

##### 4.1 Построение графиков связи $H = f(F_0)$

В предыдущем разделе были вычислены площади водной поверхности у ряда озер. Имея данные об уровнях воды на определенную дату, можно определить взаимосвязь между этими параметрами, построив график связи. В таблицах 1 – 9 приведены площади озер, а также соответствующий на эту дату уровень воды в озере. По данным этих таблиц построены графики связи, которые представлены на рисунках 15 – 23.

Таблица 1 – Данные для построения зависимости  $H = f(F_0)$  на оз. Пелено – д. Спасское

№ п/п	Дата	Уровень воды, см	Площадь зеркала, км <sup>2</sup>
1	08.09.2019	163	3.48
2	30.08.2019	157	3.55
3	14.08.2019	157	3.52
4	07.08.2019	153	3.49
5	22.07.2019	157	3.44
6	20.06.2019	160	3.58
7	11.06.2019	162	3.58
8	04.06.2019	165	3.61
9	19.05.2019	175	3.66
10	10.05.2019	185	3.70
11	24.04.2019	195	3.78
12	30.10.2018	159	3.47
13	21.09.2018	152	3.40
14	05.09.2018	152	3.39
15	11.08.2018	152	3.43
16	17.06.2018	159	3.48
17	01.06.2018	166	3.56
18	25.09.2017	188	3.70
19	17.08.2017	185	3.71
20	24.10.2016	174	3.67
21	21.08.2016	180	3.65
22	10.05.2016	183	3.67
23	01.05.2016	189	3.78

Продолжение таблицы 1

№ п/п	Дата	Уровень воды, см	Площадь зеркала, км <sup>2</sup>
24	22.10.2015	160	3.45
25	13.09.2015	158	3.58
26	19.08.2015	160	3.55
27	18.07.2015	159	3.50
28	26.09.2014	155	3.55
29	17.09.2014	154	3.55
30	09.08.2014	155	3.47
31	31.07.2014	157	3.56
32	26.04.2014	177	3.73
33	06.08.2013	161	3.57
34	03.06.2013	172	3.63

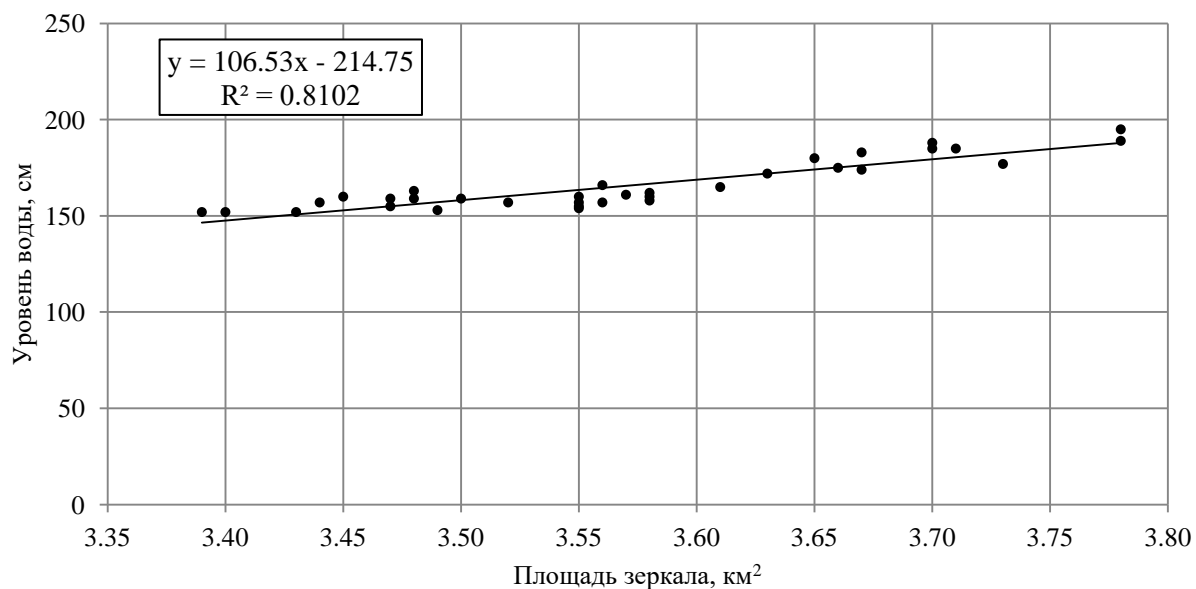


Рисунок 15 – График зависимости площади зеркала от уровня воды  $H = f(F_0)$ , оз. Пелено – д. Спасское.

Таблица 2 – Данные для построения зависимости  $H = f(F_0)$  на оз. Коробож – с. Устрека

№ п/п	Дата	Уровень воды, см	Площадь зеркала, км <sup>2</sup>
1	08.09.2019	186	5.40
2	30.08.2019	180	5.26
3	07.08.2019	167	4.90
4	22.07.2019	166	4.83
5	11.06.2019	183	5.29
6	04.06.2019	186	5.38
7	19.05.2019	202	5.54

Продолжение таблицы 2

№ п/п	Дата	Уровень воды, см	Площадь зеркала, км <sup>2</sup>
8	10.05.2019	213	5.64
9	24.04.2019	255	5.86
10	30.10.2018	174	5.25
11	21.09.2018	162	5.08
12	05.09.2018	165	4.80
13	11.08.2018	164	5.07
14	07.05.2018	264	5.75
15	25.09.2017	208	5.35
16	17.08.2017	207	4.91
17	24.10.2016	188	5.67
18	06.09.2016	173	5.44
19	21.08.2016	207	5.38
20	01.05.2016	236	5.83
21	22.10.2015	165	5.61
22	19.08.2015	171	4.95
23	09.08.2014	168	4.81
24	31.07.2014	171	5.00
25	06.06.2014	193	5.87
26	26.04.2014	226	5.43
27	07.09.2013	170	5.26
28	12.07.2013	185	4.97
29	03.06.2013	206	5.53

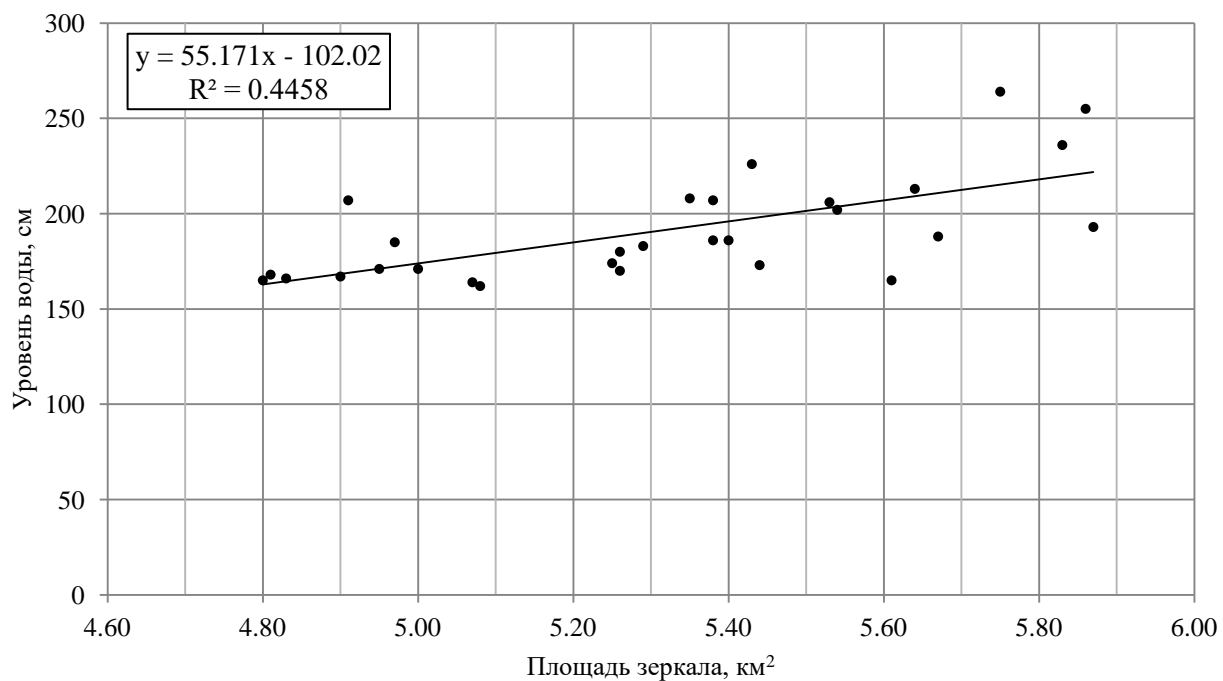


Рисунок 16 – График зависимости площади зеркала от уровня воды  $H = f(F_0)$ , оз. Коробожа – с. Устрека.

Таблица 3 – Данные для построения зависимости  $H = f(F_0)$  на оз. Шугозеро – д. Ульяница

№ п/п	Дата	Уровень воды, см	Площадь зеркала, км <sup>2</sup>
1	08.09.2019	40	4.59
2	06.09.2019	40	4.74
3	30.08.2019	41	4.73
4	21.08.2019	39	4.50
5	19.05.2019	100	4.79
6	01.05.2019	136	4.87
7	30.10.2018	65	4.82
8	05.10.2018	56	4.63
9	21.09.2018	46	4.71
10	11.08.2018	43	4.68
11	14.05.2018	109	4.83
12	07.05.2018	137	4.89
13	25.09.2017	88	4.83
14	06.09.2016	87	4.87
15	21.08.2016	97	4.78
16	24.05.2016	73	4.77
17	10.05.2016	92	4.80
18	08.05.2016	98	4.82
19	01.05.2016	124	4.85
20	11.09.2015	57	4.82
21	26.08.2015	68	4.68
22	19.08.2015	71	4.80
23	10.08.2015	78	4.71
24	17.09.2014	55	4.81
25	10.09.2014	54	4.79
26	31.07.2014	58	4.64
27	24.07.2014	61	4.80
28	08.07.2014	73	4.67
29	06.06.2014	78	4.67
30	04.06.2014	79	4.80
31	21.05.2014	84	4.76
32	19.05.2014	87	4.75
33	07.09.2013	58	4.82
34	05.09.2013	59	4.82
35	06.08.2013	59	4.70
36	04.08.2013	58	4.73
37	03.06.2013	83	4.80
38	02.05.2013	146	4.86

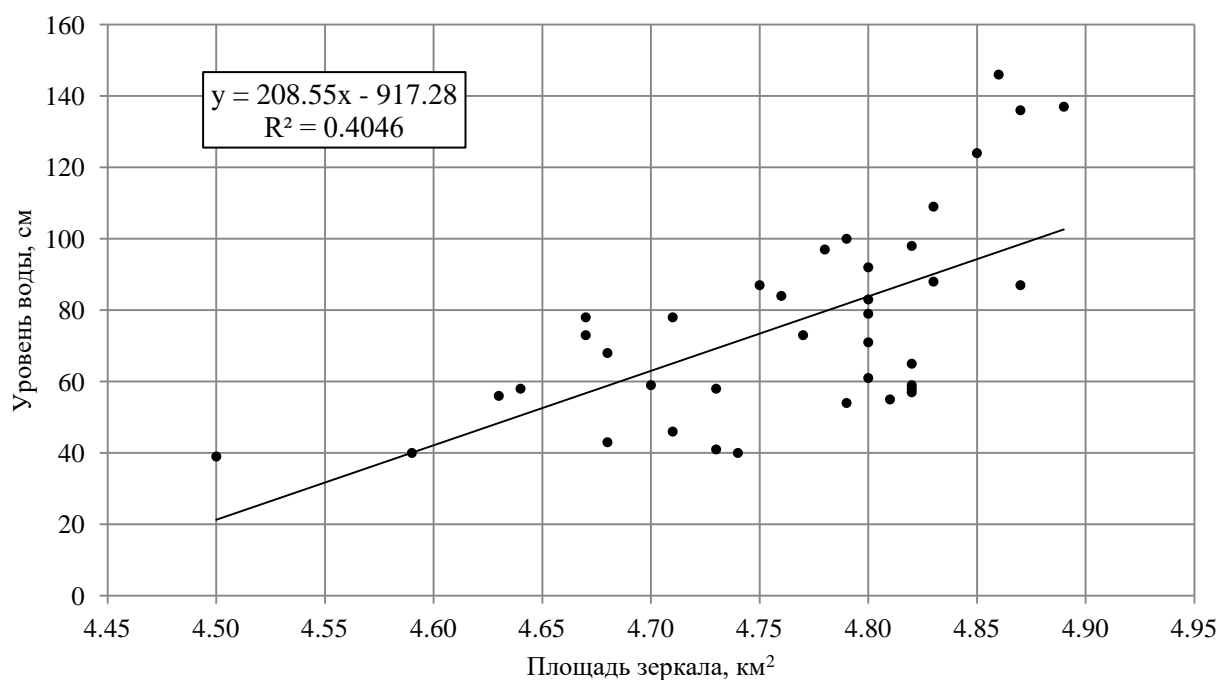


Рисунок 17 – График зависимости площади зеркала от уровня воды  $H = f(F_0)$ , оз. Шугозеро – д. Ульяница.

Таблица 4 – Данные для построения зависимости  $H = f(F_0)$  на оз. Тулмозеро – д. Колатсельга

№ п/п	Дата	Уровень воды, см	Площадь зеркала, км <sup>2</sup>
1	28.08.2019	21	10.9
2	18.06.2019	63	11.8
3	09.06.2019	83	11.9
4	17.05.2019	138	12.8
5	01.05.2019	180	13.1
6	10.09.2018	60	12.0
7	09.08.2018	40	11.9
8	17.07.2018	52	11.4
9	15.07.2018	53	11.5
10	28.05.2018	92	12.3
11	21.05.2018	116	12.5
12	14.05.2018	139	12.8
13	12.05.2018	144	12.6
14	01.11.2017	107	12.6
15	05.07.2017	71	12.1
16	20.09.2016	77	12.4
17	13.09.2016	88	12.2
18	24.05.2016	89	12.2
19	15.05.2016	109	12.6
20	08.05.2016	131	12.5
21	06.05.2016	139	12.9



Продолжение таблицы 4

№ п/п	Дата	Уровень воды, см	Площадь зеркала, км <sup>2</sup>
22	05.11.2015	83	12.3
23	11.09.2015	47	11.8
24	17.08.2015	55	11.9
25	10.08.2015	64	11.8
26	07.06.2015	103	12.1
27	08.10.2014	34	11.7
28	01.10.2014	28	11.1
29	15.09.2014	16	11.0
30	07.08.2014	16	11.1
31	20.07.2014	31	11.2
32	13.07.2014	41	11.4
33	24.04.2014	108	12.4
34	05.09.2013	64	12.1
35	01.07.2013	81	12.3

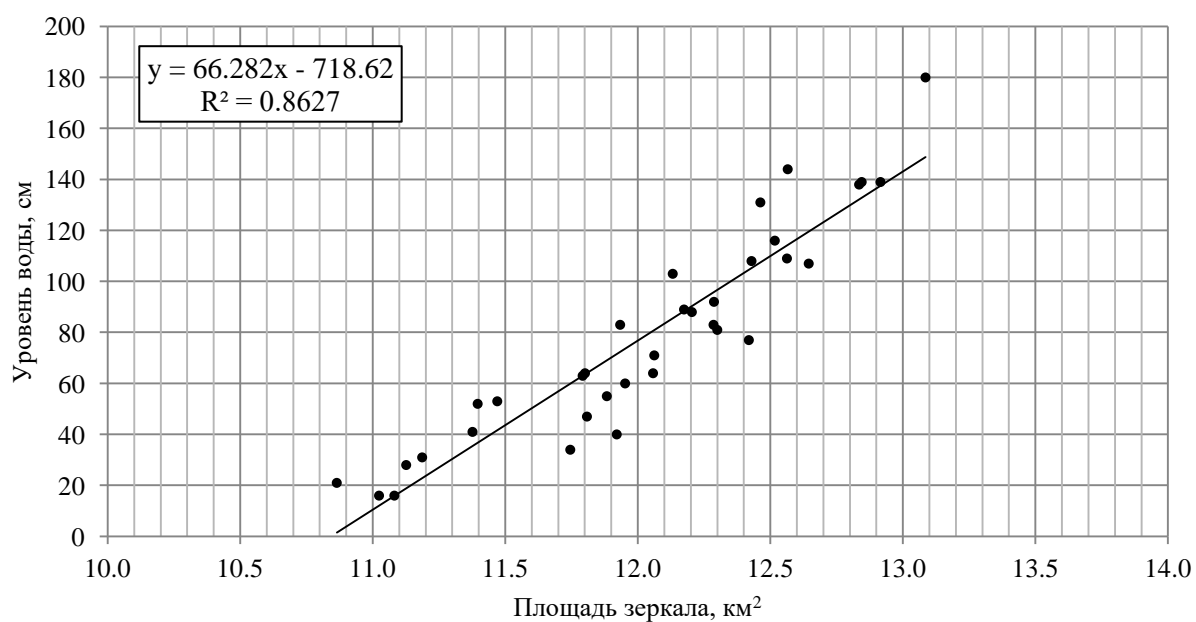


Рисунок 18 – График зависимости площади зеркала от уровня воды  $H = f(F_0)$ , оз. Тулмозеро – д. Колатсельга.

Таблица 5 – Данные для построения зависимости  $H = f(F_0)$  на оз. Лексозеро – с. Реболы

№ п/п	Дата	Уровень воды, см	Площадь зеркала, км <sup>2</sup>
1	02.09.2019	40	151
2	25.07.2019	65	153
3	16.06.2019	122	155
4	16.06.2019	122	155
5	31.07.2018	72	152
6	31.07.2018	72	153
7	29.07.2018	74	154
8	05.09.2017	98	156
9	10.07.2017	113	156
10	03.07.2017	127	152
11	08.06.2017	145	157
12	08.08.2016	66	156
13	23.06.2016	88	152
14	29.05.2016	107	155
15	03.11.2015	63	152
16	11.10.2015	63	157
17	24.08.2015	88	153
18	24.08.2015	88	154
19	22.08.2015	90	155
20	05.08.2014	56	151
21	05.08.2014	56	151
22	11.07.2014	85	154
23	03.09.2013	52	153
24	03.09.2013	52	153
25	22.06.2013	81	150
26	30.05.2013	106	154
27	28.05.2013	106	155
28	21.05.2013	105	155

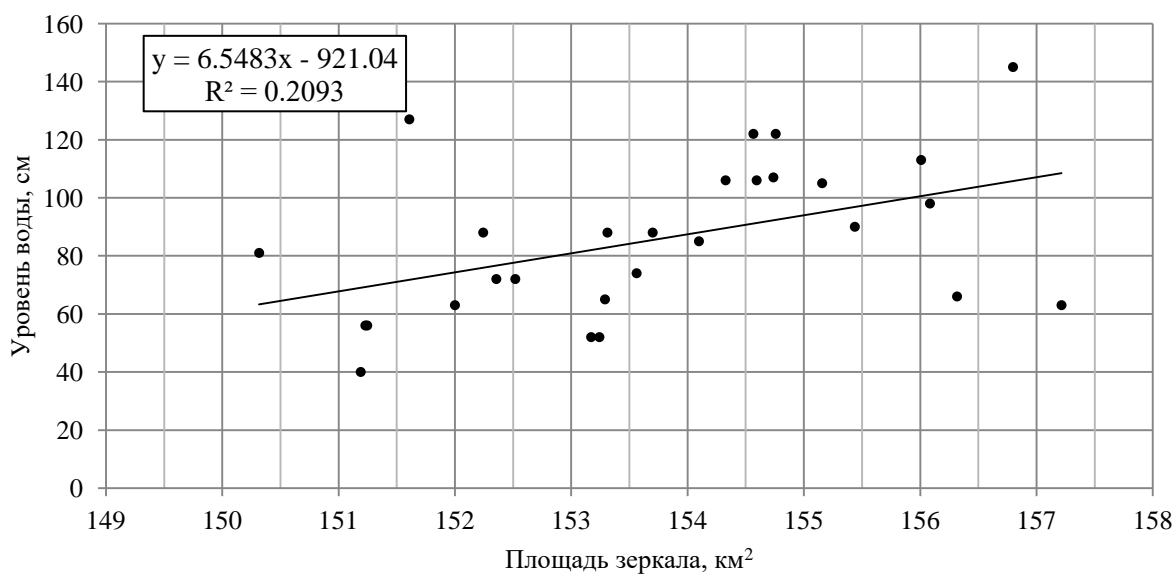


Рисунок 19 – График зависимости площади зеркала от уровня воды  $H = f(F_0)$ , оз. Лексозеро – с. Реболы.

Таблица 6 – Данные для построения зависимости  $H = f(F_0)$  на оз. Лендерское – пос. Лендеры

№ п/п	Дата	Уровень воды, см	Площадь зеркала, км <sup>2</sup>
1	20.09.2019	170	8.30
2	16.06.2019	246	9.11
3	16.08.2018	194	8.41
4	31.07.2018	205	8.75
5	29.07.2018	207	8.56
6	03.07.2017	253	9.24
7	29.05.2016	246	9.16
8	03.11.2015	208	8.82
9	11.10.2015	207	8.86
10	31.10.2014	186	8.53
11	31.10.2014	186	8.52
12	08.10.2014	184	8.50
13	27.07.2014	209	8.79
14	27.07.2014	209	8.78
15	20.07.2014	217	8.90
16	11.07.2014	234	8.99
17	11.07.2014	234	8.98
18	01.07.2013	203	8.60
19	22.06.2013	213	8.85
20	30.05.2013	230	8.92
21	21.05.2013	233	9.00

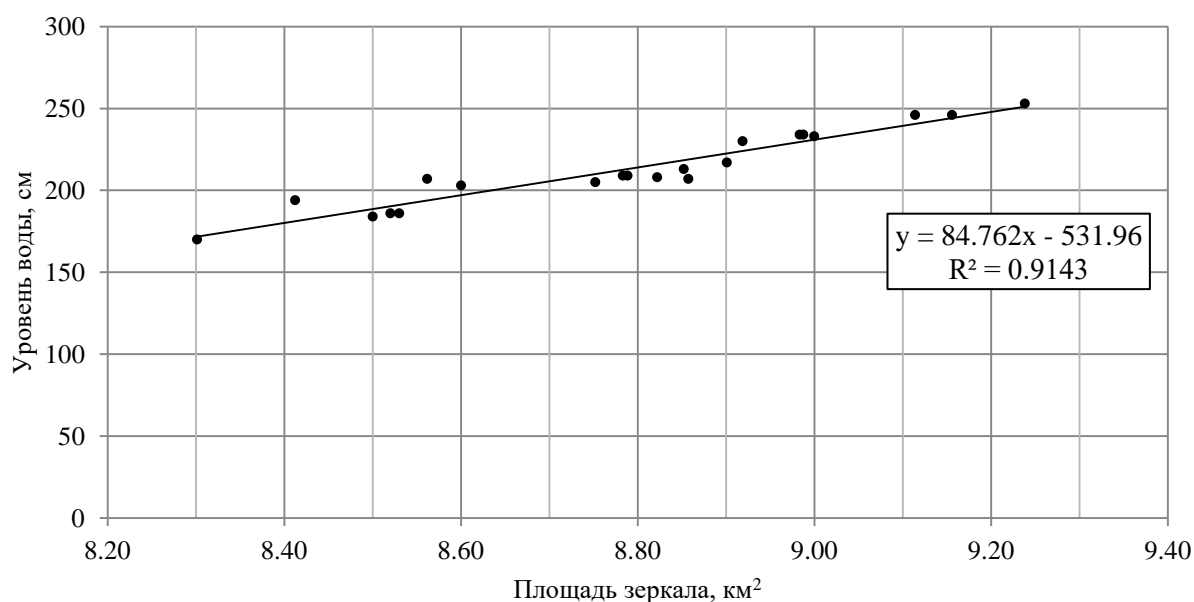


Рисунок 20 – График зависимости площади зеркала от уровня воды  $H = f(F_0)$ , оз. Лендерское – пос. Лендеры.

Таблица 7 – Данные для построения зависимости  $H = f(F_0)$  на оз. Сяберо – с. Сяберо

№ п/п	Дата	Уровень воды, см	Площадь зеркала, км <sup>2</sup>
1	04.09.2019	158	12.6
2	28.08.2019	160	12.6
3	27.07.2019	160	12.6
4	15.05.2019	175	13.0
5	29.04.2019	174	13.1
6	22.04.2019	175	13.0
7	09.08.2018	152	12.4
8	31.07.2018	154	12.5
9	28.05.2018	168	12.8
10	21.05.2018	173	13.0
11	12.05.2018	175	13.1
12	01.11.2017	178	13.2
13	23.09.2017	173	13.0
14	02.05.2017	180	13.1
15	31.05.2016	171	13.0
16	20.10.2015	147	12.4
17	24.08.2015	148	12.5
18	17.08.2015	152	12.4
19	18.04.2015	174	13.0
20	11.04.2015	173	13.1
21	24.04.2014	172	13.1

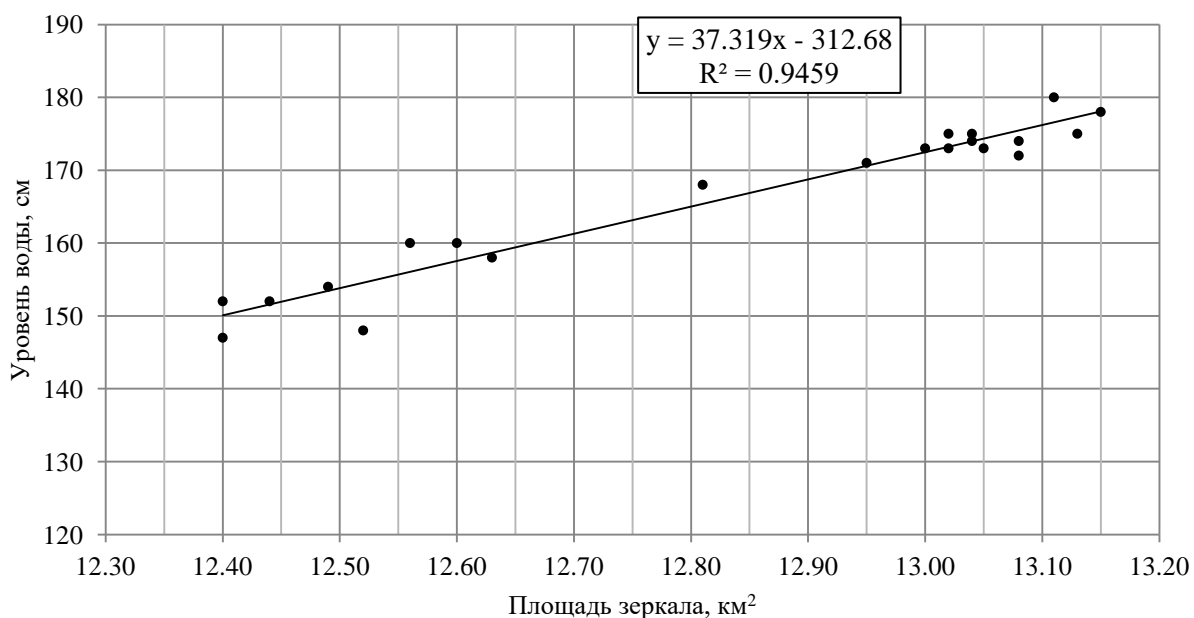


Рисунок 21 – График зависимости площади зеркала от уровня воды  $H = f(F_0)$ , оз. Сяберо – с. Сяберо.

Таблица 8 – Данные для построения зависимости  $H = f(F_0)$  на оз. Суоярви – г. Суоярви

№ п/п	Дата	Уровень воды, см	Площадь зеркала, км <sup>2</sup>
1	31.07.2018	237	55.2
2	15.07.2018	245	56.2
3	28.05.2018	292	57.3
4	12.05.2018	332	60.4
5	23.09.2017	283	59.4
6	20.09.2016	259	56.6
7	31.05.2016	269	55.6
8	15.05.2016	288	59.4
9	05.11.2015	241	56.5
10	24.08.2015	232	55.6
11	20.05.2015	309	60.2
12	01.10.2014	220	54.6
13	20.07.2014	242	53.9
14	13.07.2014	246	56.0

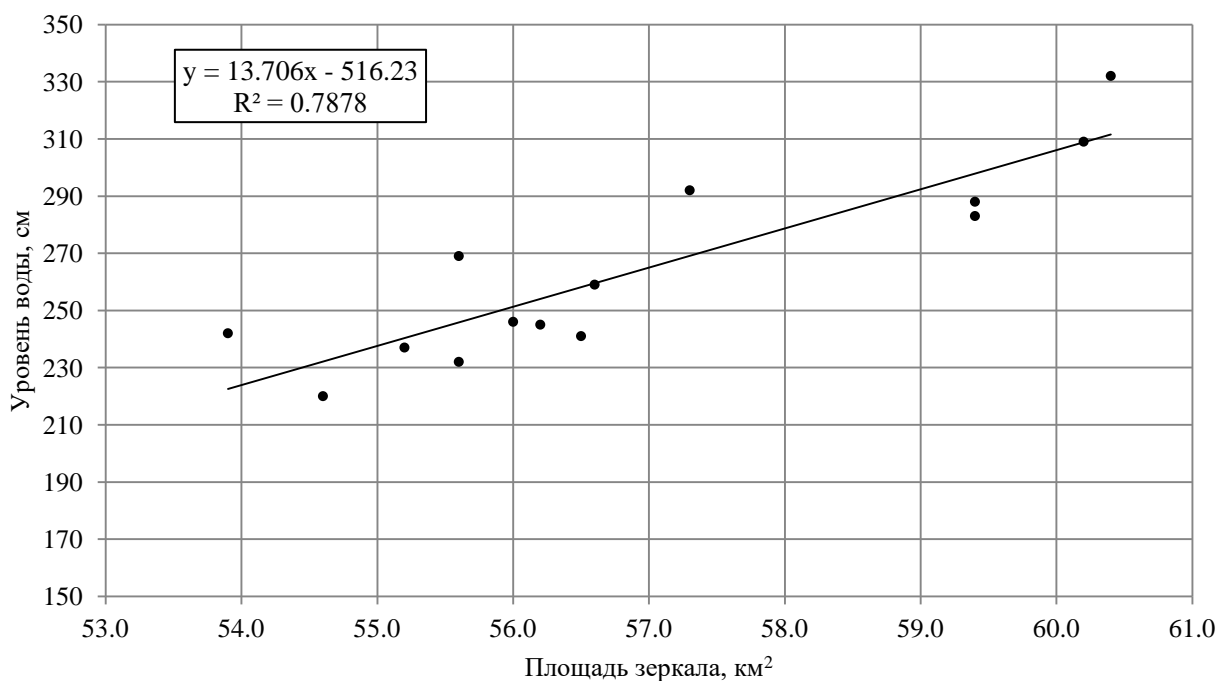


Рисунок 22 – График зависимости площади зеркала от уровня воды  $H = f(F_0)$ , оз. Суоярви – г. Суоярви.

Таблица 9 – Данные для построения зависимости  $H = f(F_0)$  на оз. Ведлозеро – с. Ведлозеро

№ п/п	Дата	Уровень воды, см	Площадь зеркала, км <sup>2</sup>
1	18.06.2019	54	52.1
2	09.06.2019	65	52.4
3	17.05.2019	94	53.4
4	01.05.2019	95	53.6
5	10.09.2018	36	51.8
6	09.08.2018	37	51.7
7	02.08.2018	36	51.5
8	17.07.2018	38	52.2
9	14.05.2018	87	53.5
10	23.09.2017	58	52.6
11	05.07.2017	55	51.9
12	13.09.2016	68	52.9
13	24.05.2016	68	52.6
14	08.05.2016	82	53.0
15	05.11.2015	37	51.7
16	17.08.2015	40	51.6
17	07.06.2015	71	52.3
18	01.10.2014	26	51.8
19	08.09.2014	26	51.5
20	07.08.2014	28	51.7
21	13.07.2014	37	51.9

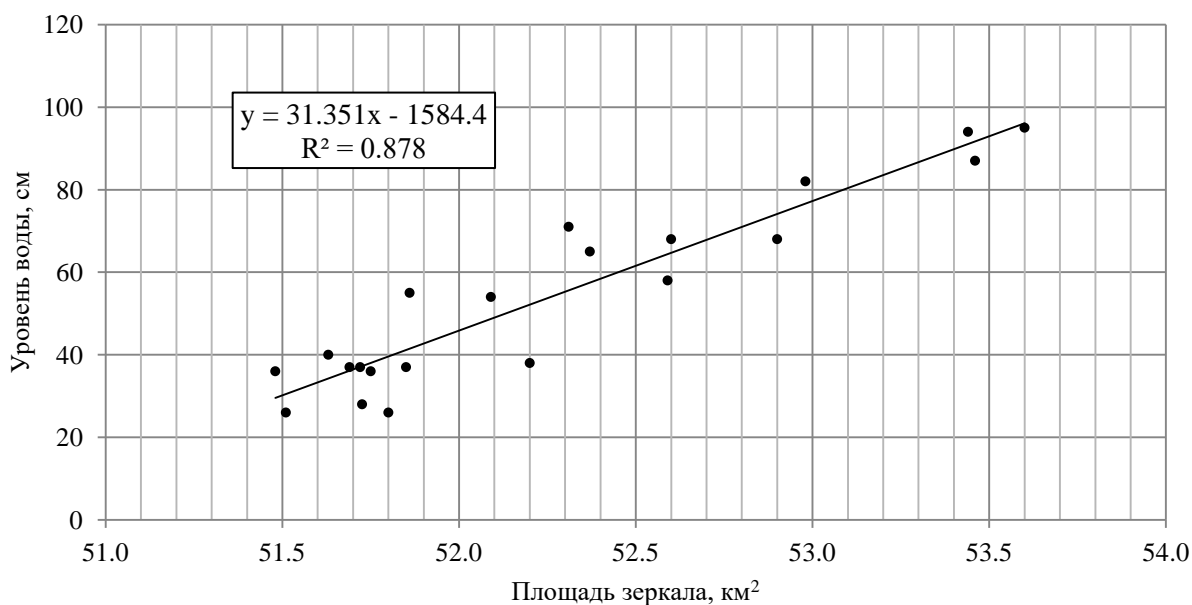


Рисунок 23 – График зависимости площади зеркала от уровня воды  $H = f(F_0)$ , оз. Ведлозеро – с. Ведлозеро.

В общей сложности был обработан 261 снимок спутника Landsat 8.

На некоторых графиках связи (рисунки 16, 17 и 19) заметен сильный разброс точек относительно средней линии. Такой эффект можно связать с искажением масштаба космического снимка. То есть масштаб при удалении от центральной линии снимка становится мельче. Иными словами, если взять два пикселя снимка: один из центральной области снимка, а второй – из боковой, то пиксель из боковой области будет содержать большую площадь Земной поверхности, хотя и размер их одинаков [11]. При обработке спутниковых снимков было множество вариантов расположения данных озер относительно центральной линии снимка. Что касается озер, у которых разброс точек относительно средней линии незначителен, то на снимках они располагались примерно в одном месте.

Дальнейшая оценка надежности уравнения регрессии покажет, для каких озер полученное уравнение регрессии можно рекомендовать к расчету.

#### 4.2 Надежность уравнения регрессии

Согласно своду правил [10] к уравнению линейной регрессии предъявляется ряд условий, выполнение которых означает надежность полученного уравнения. К этим критериям относятся:  $n \geq 10$ ,  $|R| \geq 0.7$ ,  $\frac{R}{\sigma_R} \geq 2$ ,  $\frac{a}{\sigma_a} \geq 2$ .

Как видно из таблицы 10, для озер Шугозеро, Коробожа и Лексозеро не выполняется условие с коэффициентом корреляции, полученное значение менее критического, что не позволяет считать полученные уравнения регрессии надежными. Для остальных озер все требования выполняются, что означает надежность уравнений регрессии для озер Пелено, Тулмозеро, Лендерское, Сяберо, Суоярви и Ведлозеро, а, следовательно, их можно рекомендовать для проведения практических расчетов.

Таблица 10 – Критерии надежности уравнений линейной регрессии

Озеро	$n \geq 10$	$ R  \geq 0.7$	$ R  / R \times " 4$	$a / \sigma_a \geq 2$
Пелено	34	0.90	27.2	11.7
Сяберо	21	0.97	80.4	18.2
Тулмозеро	35	0.97	39.4	14.4
Лендерское	21	0.96	49.9	14.4
Суоярви	14	0.89	15.1	6.67
Ведлозеро	21	0.94	34.3	11.7
Шугозеро	38	0.64	6.50	4.95
Коробожа	29	0.67	6.38	4.66
Лексозеро	28	0.46	3.01	2.62

В дальнейшем из всех расчетов будут исключены озера Шугозеро, Коробожа и Лексозеро.

Для оценки точности определения уровней воды в озерах по полученным зависимостям была рассчитана стандартная ошибка уравнений линейной регрессии по формуле:

$$\sigma_{y(x)} = \sigma_y \sqrt{1 - R^2} \quad (1)$$

где,  $\sigma_y$  – среднеквадратическое отклонение ряда уровней озера;  $R$  – коэффициент корреляции зависимости  $H = f(F_0)$ . Результаты расчета представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Оценка погрешности расчета по зависимостям  $H = f(F_0)$ , представленным на рисунках 15 – 23

Озеро	Средняя площадь зеркала $F$ , км <sup>2</sup>	Стандартная ошибка уравнений линейной регрессии $\sigma_{y(x)}$ , см	Средняя амплитуда уровней воды , см	$\sigma_{y(x)} / \cdot 100\%$
Пелено	3.57	5.47	41	13
Сяберо	12.8	2.48	28	9
Тулмозеро	12.0	15.3	138	11
Лендерское	8.79	6.60	96	7
Суоярви	56.9	15.0	85	18
Ведлозеро	52.3	7.88	58	13



Как видно из таблицы 11, для представленных озер ошибка расчета не превышает 20%. Таким образом, полученные значения не выходят за общие границы погрешностей, и метод, который мы рассматриваем, можно применять для определения уровней озер при отсутствии регулярных наблюдений. Для реализации метода помимо спутниковых данных, нужна зависимость  $H = f(F_0)$ , которую можно построить по результатам топографической съемки.

При использовании спутниковых данных с более высоким пространственным разрешением точность расчета можно повысить.

#### 4.3 Проверка уравнений регрессии на независимом материале

Окончательно убедиться в надежности уравнений регрессии можно, проверив их на независимом материале. Для шести озер были отобраны по три спутниковых снимка, по которым были определены площади водной поверхности. Полученные значения были подставлены в соответствующие уравнения регрессии, результатом являются уровни воды в озере. Далее приводится сравнение рассчитанных и фактических уровней воды.

Таблица 12 – Сравнение фактических и рассчитанных уровней воды оз. Пелено – д. Спасское

№ п/п	Дата	F, км <sup>2</sup>	H <sub>рассчит</sub> , см	H <sub>фактич</sub> , см	ΔH, см	δ, %
1	07.09.2013	3.59	168	153	-15	9.8
2	29.04.2015	3.74	184	191	7	3.7
3	07.05.2018	3.73	183	188	5	2.7
				Среднее	-1.0	5.4

Таблица 13 – Сравнение фактических и рассчитанных уровней воды оз. Сяберо – д. Сяберо

№ п/п	Дата	F, км <sup>2</sup>	H <sub>рассчит</sub> , см	H <sub>фактич</sub> , см	ΔH, см	δ, %
1	04.10.2015	12.5	154	148	-6	4.1
2	17.05.2014	13.1	176	173	-3	1.7
3	12.10.2018	12.7	161	162	1	0.6
				Среднее	-2.7	2.1

Таблица 14 – Сравнение фактических и рассчитанных уровней воды оз. Тулмозеро – д. Колатсельга

№ п/п	Дата	F, км <sup>2</sup>	H <sub>рассчит</sub> , см	H <sub>фактич</sub> , см	ΔH, см	δ, %
1	23.09.2017	12.5	110	100	-10	10.0
2	23.05.2013	12.5	110	119	9	7.6
3	31.07.2018	11.4	37	40	3	7.5
				Среднее	0.7	8.4

Таблица 15 – Сравнение фактических и рассчитанных уровней воды оз. Лендерское – пос. Лендеры

№ п/п	Дата	F, км <sup>2</sup>	H <sub>рассчит</sub> , см	H <sub>фактич</sub> , см	ΔH, см	δ, %
1	03.09.2013	8.45	184	193	9	4.7
2	05.08.2014	8.76	211	199	-12	6.0
3	24.08.2015	9.00	231	224	-7	3.1
				Среднее	-3.3	4.6

Таблица 16 – Сравнение фактических и рассчитанных уровней воды оз. Суоярви – г. Суоярви

№ п/п	Дата	F, км <sup>2</sup>	H <sub>рассчит</sub> , см	H <sub>фактич</sub> , см	ΔH, см	δ, %
1	03.06.2015	58.3	283	288	5	1.7
2	09.08.2018	55.2	240	233	-7	3.0
3	17.05.2019	61.5	327	315	-12	3.8
				Среднее	-4.7	2.8

Таблица 17 – Сравнение фактических и рассчитанных уровней воды оз. Ведлозеро – с. Ведлозеро

№ п/п	Дата	F, км <sup>2</sup>	H <sub>рассчит</sub> , см	H <sub>фактич</sub> , см	ΔH, см	δ, %
1	21.05.2018	53.3	87	81	-6	7.4
2	11.09.2015	51.6	33	34	1	2.9
3	24.04.2014	52.5	62	56	-6	10.7
				Среднее	-3.7	7.0

Как видно из таблиц 12 – 17, средняя погрешность определения уровня воды озер не превышает 10%. В среднем погрешность определения составляет 5%. Следовательно, можно сделать вывод о том, что данные уравнения регрессии можно применять к практическим расчетам, и точность расчета является приемлемой.

## Заключение

В настоящей работе было проведено исследование по определению взаимосвязи между площадью водной поверхности и уровнями воды в озере. При обработке использовались данные с космического спутника Landsat 8, в общей сложности был обработан 261 снимок.

Для анализа было выбрано девять озер, для шести из них результаты получились хорошими, и уравнение регрессии можно рекомендовать к практическому расчету. Неудовлетворительные зависимости были получены для озер Лексозеро, Коробожя и Шугозеро, такие результаты могут быть связаны с искажением масштаба космического снимка.

Проверка уравнений регрессии на независимом материале показала, что рассчитать уровни воды в озере можно с хорошей точностью.

Резюмируя вышеизложенное, можно сказать, что данная методика годится для определения уровней при отсутствии постоянных наблюдений при закрытии гидрологического поста. Для увеличения точности расчетов можно пользоваться спутниковыми данными с более высоким разрешением.

## Список использованных источников

1. Догановский, А. М. Гидрология суши/А. М. Догановский. — Санкт-Петербург: РГГМУ, 2012. — 524 с. — Текст: непосредственный.
2. Догановский, А. М. Сборник практических задач по определению основных характеристик водных объектов суши (практикум по гидрологии)/А. М. Догановский, В. Г. Орлов. — Санкт-Петербург: РГГМУ, 2011. — 315 с. — Текст: непосредственный.
3. Водогрецкий, В. Е. Ресурсы поверхностных вод СССР, том 2 ч.1 / В. Е. Водогрецкий. — Ленинград: Гидрометиздат, 1972. — 528 с. — Текст: непосредственный.
4. Румянцев, В. А. Россия - страна озер / В. А. Румянцев. — Санкт-Петербург: ВОО "Русское Географическое Общество" Российская Академия Наук, 2015. — 450 с. — Текст: непосредственный.
5. Ответственный редактор З.В. Ремезова Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Часть 2, Том 1, Выпуск 5 / Ответственный редактор З.В. Ремезова. — Санкт-Петербург: СЗ Гидромет, 2000. — 75 с. — Текст: непосредственный.
6. EarthExplorer [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. — Дата доступа: 14.02.2022.
7. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://gmvo.skniivh.ru/>. — Дата доступа: 14.02.2022.
8. Landsat Science [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>. — Дата доступа: 19.03.2022.
9. GIS-Lab [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://gis-lab.info/>. — Дата доступа: 19.03.2022

10. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик СП-33-101 2003. — Москва: , 2004. — с. — Текст: непосредственный.
11. Геометрические искажения и геометрическая коррекция спутниковых снимков / Д. С. Ергалиев, А. Д. Тулегулов, Ж. С. Мусагулова, А. Б. Нысанбаева // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2013. – Т. 1. – С. 359-361