

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

Кафедра прикладной и системной экологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

На тему Исследование пространственного распределения температуры воды Ладожского озера в районе Валаамского архипелага, на основе прямых измерений и данных дистанционного зондирования

Исполнитель Михайлова Светлана Евгеньевна

Руководитель ст. преподаватель

Бабин Александр Валерьевич

Санкт-Петербург 2017

Оглавление

| | |
|---|----|
| Введение..... | 4 |
| 1. Температура воды как экологический фактор..... | 7 |
| 1.1 Температурная стратификация..... | 8 |
| 1.2 Термический бар..... | 11 |
| 2 Дистанционное зондирование Земли..... | 12 |
| 2.1 Дистанционные методы измерения температуры воды..... | 14 |
| 2.2 Программа Landsat..... | 16 |
| 3. Физико-географическое описание района исследования..... | 18 |
| 4 Материалы и методы исследования..... | 21 |
| 4.1 Описание исходных данных..... | 21 |
| 4.2 Методы прямого измерения температуры воды..... | 24 |
| 4.3 Программное обеспечение, использованное для обработки исходных данных..... | 26 |
| 4.4 Определение температуры по данным спутниковых снимков..... | 28 |
| 5 Пространственное распределение температуры воды Ладожского озера в районе Валаамского архипелага летом 2016 года..... | 30 |
| 5.1 Особенности вертикального распределения температуры воды в прибрежной зоне Валаамского архипелага..... | 30 |
| 5.3 Оценка температуры верхнего термически однородного слоя воды на основе данных дистанционного зондирования..... | 36 |
| 5.4 Разработка модели анализа данных для автоматизированного вычисления температуры на основе данных дистанционного зондирования.. | 39 |
| Заключение..... | 40 |

| | |
|---------------------------------------|----|
| Список использованных источников..... | 43 |
|---------------------------------------|----|

Введение

Температура — одна из важнейших характеристик, описывающая физические свойства воды. Это одна из самых распространённых измеряемых величин в водоёмах. Температура воды определяет распределение по плотности, и, следовательно, вертикальную устойчивость водной толщ пресного озера, возникновение различного рода циркуляционных течений, влияние на дрейфовые течения [1].

Также температура является важнейшим экологическим фактором, от которого зависит множество физических, химических и биологических процессов.

Изучение температуры важно для всех экологических исследований. Температура воды подлежит обязательному измерению при любых гидрохимических исследованиях и в момент отбора проб. Регулярное измерение температуры воды по глубине и на поверхности очень важно для мониторинга вод суши и составления статистической базы данных. Также данная характеристика относится к одному из важнейших параметров, которые необходимы для составления термогидродинамических уравнений и моделей, которые описывают состояние водоёма. Значения температуры на поверхности воды очень ценно, так как любое отклонение температуры поверхности водоёма от норм, которые определяются статистически, служит индикатором изменения подводной и окружающей среды.

Исследование методов измерения и мониторинга температуры, её пространственного распределения очень важно, так как изучение динамики температуры водоема предоставляет физическую основу для понимания ряда химических и биологических процессов [1], изучение которых нужно для

оценки состояния водоёма и качества воды в нём. Особый интерес для исследований, связанных с оценкой продукционных параметров водоемов, представляет распределение температуры воды в фотической зоне – слое водной массы, в котором протекают процессы фотосинтеза.

Существует множество разных способов измерения температуры водной массы. Так, для измерения температуры поверхности воды используют электрические и жидкостные термометры. Обычно применяются ртутные термометры, так как у них наиболее широкий диапазон измерения. Для измерения низких температур (например, в полярных регионах) используют термометры с органическими жидкостями, такими как этиловый спирт. Для измерения температуры воды на разных горизонтах также применяют электрические и специальным образом сконструированные опрокидывающиеся термометры, дистанционные датчики температуры и датчики-самописцы.

Дистанционное измерение температуры воды основано на использовании специальных датчиков, расположенных в разных местах исследуемого водоёма, с помощью плавучих буёв, которые автоматически измеряют температуру воды с заданной периодичностью за определённый период времени. Также к дистанционному измерению температуры относится космическая съёмка поверхности Земли с помощью спутниковых систем. Определение температуры поверхности водоёма основано на измерении излучения в окнах прозрачности в ИК диапазоне спектра.

Объектом исследования данной работы является северная часть Ладожского озера в районе Валаамского архипелага.

Ладожское озеро является самым крупным пресным озером Европы. Оно – источник воды для жителей населенных пунктов и нужд промышленных предприятий. Фактически, Санкт-Петербург обеспечивается водой за счёт его вод, так как река Нева, откуда ведётся забор воды городскими станциями «Водоканала», берет свой исток в Ладожском озере.

Предметом исследования является пространственное распределение температуры воды озера и его динамика. В работе рассматриваются различные методы измерения температуры воды: локальные и дистанционные.

Для работы были использованы данные дистанционного зондирования Земли, данные точечных измерений, предоставленные сотрудниками УНС «Валаам», а также собственные наблюдения и измерения, полученные в ходе учебно-производственной практики на острове Валаам.

Целью настоящей работы является исследование пространственного распределения температуры воды Ладожского озера в районе Валаамского архипелага.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

- Рассмотреть роль температуры как экологического фактора;
- ознакомиться с методами локального и дистанционного измерения температуры воды;
- оценить возможность использования данных дистанционного зондирования для определения температуры фотического слоя;
- разработать модель геоинформационного анализа данных дистанционного зондирования для автоматизированного построения карт пространственного распределения температуры воды.

Выполнение всех поставленных задач позволит одновременно оценить пространственное распределение температуры значительной части озера. А также получить инструмент, предоставляющий возможность оценить распределение температуры самой биологически активной части водной массы водоема – фотической зоны. Полученная информация может быть использована при гидрохимических и гидробиологических исследованиях, а также при моделировании водных экосистем и при проведении других исследований в которых необходимы данные о значениях температуры как одного из важнейших факторов среды.

1. Температура воды как экологический фактор

Температура является важным экологическим фактором. От температуры зависит протекание многих физических процессов. Также температура влияет на протекание химических процессов, происходящих в водной среде. Именно от температуры зависит интенсивность метаболизма организмов, обитающих в воде и на суше, скорость их питания, роста и созревания.

Температурный режим водоёмов отличается своей устойчивостью, по сравнению с поверхностью суши. Причиной этого являются особенные физические свойства воды. Вода имеет высокую теплоемкость. Нагрев ее происходит медленно, но и остывает вода тоже медленно. В результате такого свойства воды крупные водные объекты могут влиять на климат прилегающих регионов. Они выравнивают ход температуры в атмосфере и прибрежных районах, формируя особый тип климата [2].

Температура воды определяет растворимость химических веществ. С увеличением температуры увеличивается растворимость химических веществ, таким образом, растет их концентрация в воде. При низкой температуре определённые химические соединения могут выпадать в осадок и плохо проникать в организм гидробионтов, населяющих водоём.

Температура может влиять и на устойчивость водных организмов к воздействию токсичных веществ. Так как изменение температуры приводит к изменению скорости обмена веществ и скорости всасывания токсинов. Так например, при увеличении температуры воды растет чувствительность рыб к ядам, сокращается время проявления симптомов интоксикации и ускоряется гибель. Все это может привести к тому, что концентрация вещества, являющаяся нетоксичной при одной температуре, оказывается смертельной при ее повышении [2].

1.1 Температурная стратификация

Температурная стратификация – разделение водной толщи в водоёмах на слои различной плотности, возрастающей с глубиной. Температурная стратификация оказывает значительное влияние на жизнь водных организмов, так как она является причиной возникновения плотностных барьеров и влияет на устойчивость водных масс, что оказывает влияние на перенос и рассеивание примесей. Она зависит от времени года, от географического расположения водоема, прозрачности воды. Температурная стратификация может быть прямой и обратной. При прямой стратификации температура воды возрастает от дна к поверхности водоёма, а при обратной, наоборот, происходит понижение температуры воды от дна к поверхности. Данные особенности стратификации основаны на одном из аномальных свойств воды – наличии максимума плотности при температуре 4 °С. Именно поэтому и вода, которая имеет температуру выше этой, и имеет температуру ниже, расположена на вышележащих слоях водного тела, тогда как вода с температурой максимальной плотности занимает нижние.

В 1957 году Дж. Хатчинсон предложил классификацию озёр по степени гомотермии, т.е. перемешиванию водных масс, в результате которого во всей толще воды устанавливается одинаковая температура, что является очень важным процессом для перераспределения питательных веществ в толще воды и, следовательно, для всего функционирования водной экосистемы [3].

По классификации Хатчинсона были выделены следующие классы:

- Амиктические озера. К ним относятся полярные арктические и антарктические озера. Эти озера круглый год они покрыты льдом, под поверхностью которого наблюдается постоянная обратная стратификация. Перемешивание водной массы в таких озерах не происходит;

- Холодные мономиктические озера. К этому типу относятся приполярные озера, которые большую часть года покрыты льдом. Летом, после освобождения поверхности ото льда, происходит одноразовое перемешивание и на короткий момент наступает гомотермия;
- Димиктические озера. К ним относятся водоемы умеренной полосы. Для этих озёр характерна весенняя гомотермия, после чего в течение летнего сезона наблюдается прямая температурная стратификация, которая сменяется осенней гомотермией (второе перемешивание вод за год). При дальнейшем охлаждении водоема наступает зимняя обратная стратификация;
- Теплые мономиктические. Этот тип представлен субтропическими озерами. Весной, летом и осенью в данных водоёмах наблюдается прямая стратификация. Только зимой при охлаждении водной массы наступает период гомотермии;
- Олигомиктические озера. Это тропические, экваториальные и субэкваториальные водоемы. Характерный признак этого класса - круглогодичное наличие прямой стратификации.

Ф. Раттнер внёс небольшие изменения, добавив к данной классификации в 1963 г. еще два класса:

- Холодные полимиктические озера. К ним отнесены субарктические, субантарктические, а также высокогорные озера. Особенность данного класса в том, температура воды в данных водоёмах примерно постоянна и близка к 4°C, что приводит к почти постоянному перемешиванию;
- Теплые полимиктические озера. Это мелководные водоемы, расположенные в тропической зоне. Благодаря небольшой глубине, водная масса этих озёр регулярно перемешивается под действием

ветровых течений, несмотря на то, что температура воды всегда выше 4 °С.

1.2 Термический бар

Во многих глубоких озерах, расположенных в умеренных широтах наблюдаются явления термобара. Термобар это явление, при котором водная масса озера, по температурным условиям делится на две части: теплоактивная область (ТАО) – весной она расположена в прибрежной зоне, а осенью – в открытой части озера, и теплоинертная область (ТИО) – весной она располагается в открытой части озера, а осенью – в прибрежье, и между этими частями находится слой с наибольшей плотностью воды [4].

Термобар начинает формироваться весной при нагревании мелкой, прибрежной части водоема выше $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ и осенью в период охлаждения ниже $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Весной прогрев прибрежной области водоема идет несколько быстрее, чем центральной. В том случае, когда поверхностные воды прибрежной части быстрее достигают температуры максимальной плотности близкой к $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$, возникает неустойчивость плотностной стратификации, вызывающая процесс конвективного перемешивания. Конвективное движение вод прибрежной и центральной части водоема приводит к образованию узкого вертикального слоя, который фронтально разделяет водоем на две области с разной скоростью и температурой.

Термобар служит отличным естественным барьером, предотвращая смешивание теплых и холодных вод, он оказывает влияние на экосистемы крупных озёр, так как он разделяет две зоны с разными характеристиками воды, что определяет пространственные различия планктонных сообществ.

2 Дистанционное зондирование Земли

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) – метод измерения свойств объектов на земной поверхности в котором используются данные, полученные с помощью воздушных летательных аппаратов и искусственных спутников Земли [5].

В методах ДЗЗ используют сенсорное оборудование, размещённое на летательных аппаратах или космических спутниках, которое регистрирует электромагнитное излучение, которое может быть отражено или излучено объектом. Чаще всего при применении методов ДЗ используют инфракрасный диапазон отраженного излучения, тепловой инфракрасный и радиодиапазон электромагнитного спектра. Схема принципа ДЗЗ представлена на рисунке 2.1.

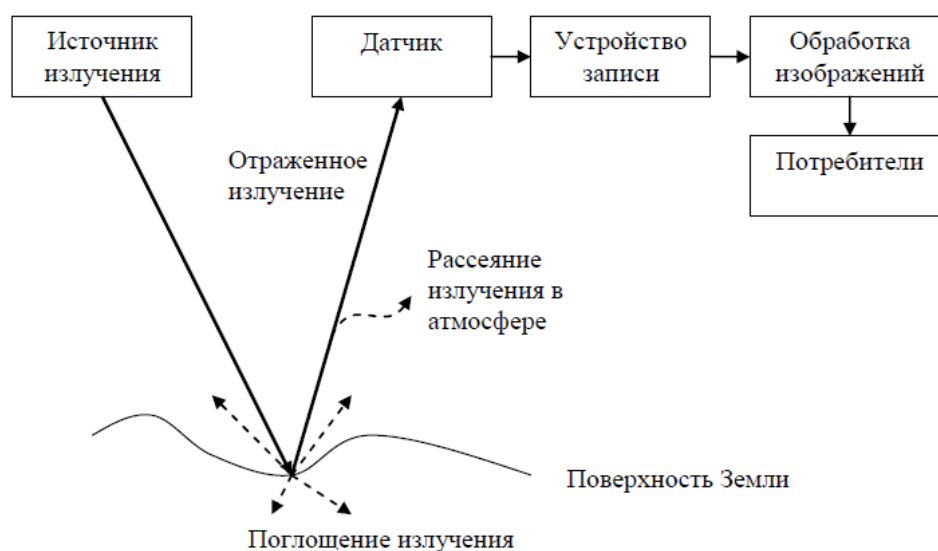


Рисунок 2.1 – Схема дистанционного зондирования Земли

Началом современного этапа космического ДЗЗ принято считать запуск искусственного спутника Landsat, на борту которого была установлена сканирующая аппаратура MSS в 1972 году. Благодаря этому оборудованию появилась возможность получать снимки в нескольких спектральных диапазонах. Отличительной чертой MSS была возможность передачи снимков со спутника в цифровом формате и их высокое разрешение (80 метров).

Аппараты, запущенные после 1972 года были дополнены ещё четырьмя системами MSS и двумя комплектами съёмочной аппаратуры Thematic Mapper и съёмочной системой Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) [5].

Таблица 2.1 – Характеристики основных спутников систем зондирования

| Датчик | Возможный масштаб |
|----------------|-------------------|
| Landsat 7 ETM+ | 1:100 000 |
| SPOT 5 | 1:25 000 |
| EROS | 1:10 000 |
| OrbView-3 | 1:5 000 |
| IKONOS | 1:5 000 |

Основными преимуществами использования ДЗЗ является то, что съёмка происходит с высокой периодичностью, а снимки могут охватывать большую площадь. Также полученные данные могут содержать в себе информацию в различных спектральных диапазонах и иметь разное разрешение снимков в зависимости от области применения и поставленных задач.

С помощью данных ДЗЗ возможно решить ряд задач, а именно:

- Определение геометрических и пространственных характеристик различных объектов;
- Создание различных тематических карт;
- Мониторинг изменений произошедших на местности;
- Создание цифровых моделей рельефа;

- Оценка влияния антропогенного воздействия на наземные и водные экосистемы;

Методы дистанционного зондирования Земли применяются в различных областях человеческой деятельности. Например, в сельском хозяйстве для анализа состояния сельскохозяйственных культур, прогноза урожая и исследования эрозии почв. В картографии и метеорологии. Также в нефтедобывающей, минеральной и газодобывающей промышленности. Методы дистанционного зондирования применяются в военной области для разведки и тактического анализа. Искусственные спутники Земли, позволяющие осуществлять съёмку земной поверхности периодически, используются в области охраны окружающей среды, её мониторинга и оценки состояния, а также для наблюдения таких процессов как: обезлесение, опустынивание, развитие процесса урбанизации и городской инфраструктуры. Данные дистанционного зондирования можно использовать для моделирования и прогноза развития природной среды, измерения температуры поверхности земли и воды

2.1 Дистанционные методы измерения температуры воды

Собственное и отражённое излучение объектов содержит информацию для анализа поверхности Земли дистанционными методами. Излучение представляет собой электромагнитные волны разной длины. Их спектр варьируется в диапазоне от рентгеновского до радиоизлучения. Для измерения температуры окружающей среды используют более узкую, инфракрасную (ИК), область спектра. Как правило, съёмка производится в средней (SWIR) и дальней (TIR) частях ИК области спектра (с длиной волны 1.5 – 3.0 и более 3.0 мкм, соответственно). В указанных спектральных диапазонах распространяется

собственное тепловое излучение объектов земной поверхности. Интенсивность излучения в основном обусловлена тепловым состоянием излучающей поверхности, поэтому съемку, выполняемую в средней (SWIR) и дальней (TIR) частях ИК области спектра, называют "тепловой инфракрасной" [6].

Температура поверхности, рассчитанная по данным одномоментной съемки, характеризует пространственную дифференциацию теплового поля и является достаточно информативной при решении широкого спектра задач[6].

2.2 Программа Landsat

Программа Landsat является одним из самых продолжительных проектов по созданию спутниковых фотоснимков Земли. Данная программа осуществляет сбор и хранение многоспектральных изображений, сохранение качества изображений и доступности данных, бесплатное распространение снимков, сделанных спутниками Landsat.

Последним спутником данной программы является Landsat-8. Спутник Landsat-8 получает данные, используя два набора инструментов: Operational Land Imager (OLI) и Thermal InfraRed Sensor (TIRS). Первый набор получает изображения в 9 диапазонах видимого света и ближнего инфракрасного излучения (ИК), второй набор – в 2 диапазонах дальнего (теплого) ИК. Спутник рассчитан на срок активного существования в 5,25 лет, однако запас топлива позволяет использовать его до 10 лет [7].

Диапазон 1 чувствителен к темно-синим и фиолетовым цветам. Синий цвет трудно различать из космоса, так как он хорошо рассеивается на пыли и частичках воды в воздухе, а также на самих молекулах воздуха.

Диапазоны 2, 3 и 4 представлены видимыми – синим, зеленым и красным диапазонами длин волн.

Диапазон 5 измеряет ближний инфракрасный спектр. Эта часть спектра особенно важна для изучения растительности, так как вода, содержащаяся в листьях здоровых растений, отражает ее. Сравнивая с изображениями других диапазонов, получают индексы вроде NDVI (Normalized Difference Vegetation Index – нормализованный разностный вегетационный индекс) – простой количественный показатель количества фотосинтетически активной биомассы, с помощью которого возможно точно измерить степень здоровья растений.

Диапазоны 6 и 7 покрывают разные участки коротковолнового ИК. Они дают возможность отличать сухую землю от влажной, а также скалы и почвы, которые очень похожи на снимках в других диапазонах, но отличаются в ИК.

Диапазон 8 – панхроматический. Данный диапазон воспринимает больше света и дает самую четкую картинку среди всех диапазонов. Его разрешение составляет 15 метров.

Диапазон 9 является особенностью Landsat-8. Он покрывает очень узкую полосу длин волн – 1370 ± 10 нанометров. Немногие из космических инструментов способны регистрировать данную область спектра, поскольку она почти полностью поглощается толщей атмосферы. В этом состоит преимущество спутников системы Landsat-8. Так как земля в этом диапазоне почти неразличима, значит все, что в нём ярко видно, либо обладает очень высокой отражательной способностью, либо находится за пределами атмосферы. В Диапазоне 9 видны только облака, которые представляют основную проблему для спутниковых снимков, так как размытые края плохо различимы в обычных диапазонах, а снимки, сделанные сквозь них, могут иметь расхождения с другими. С помощью 9 диапазона это легко отследить [7].

Диапазоны 10 и 11 – это тепловое ИК или TIR (thermal infrared). Они измеряют температуру поверхности, в то время как погодные станции измеряют температуру воздуха, которая иногда может быть несколько ниже [8].

3. Физико-географическое описание района исследования

Ладожское озеро относится к бассейну Балтийского моря Атлантического океана. Расположено в Республике Карелия (северный и восточный берег) и Ленинградской области (западный, южный и юго-восточный берег).



Рисунок 3.1 – Географическое расположение объекта исследования

Ладожское озеро является самым крупным водоёмом в системе великих европейских озёр. Оно занимает площадь 18134 км², из которых 457 км² приходится на долю островов. Средняя глубина озера – 51 м. В 12 км к западу от острова Валаам располагается самая глубокая впадина Ладожского озера с максимальной глубиной 230 м. Объём водной массы Ладоги достигает 908 км³. Длина материковой береговой линии составляет 1570 км.

Водосборный бассейн Ладожского озера чрезвычайно велик (258600 км²) и объединяет в себе бассейны озёр Онежского, Ильмень и Сайма, сток из которых в Ладожское озеро осуществляется по рекам Свирь, Волхов и Вуокса. На долю этих основных притоков приходится около 80% поступления речных вод в Ладожское озеро [9].

Климат над Ладожским озером умеренный, переходный от умеренно-континентального к умеренно-морскому. В холодный период года над Ладожским озером преобладают ветры южных направлений, в тёплое время – северные ветра. Ветры над озером способны довольно быстро менять своё направление.

Согласно классификации Хатчинсона Ладожское озеро относится к димектическому, что означает перемешивание водных масс в весенний и осенний периоды с явлением весенней и осенней гомотермии. Летом наблюдается прямая стратификация и обратная – зимой.

В Ладожском озере, как и в других крупных пресноводных озерах умеренной климатической зоны, дважды в год, в период весеннего нагревания и осеннего охлаждения воды, существует фронтальная зона (термобар). Это явление вызвано аномалией пресной воды, имеющей максимальную плотность при температуре +4°C. Эта фронтальная зона весной разделяет в озере прибрежные стратифицированные воды от квазиизотермических центральных и характеризуется большими горизонтальными градиентами температуры воды.

По мере прогрева водных масс термобар перемещается к центру озера. Скорость движения фронта изменяется в зависимости от уклона дна [10].

Озеро полностью покрывается льдом лишь к февралю, причём примерно раз в 4 – 5 лет его центральная часть (участок южнее Валаама) не замерзает. Таяние льда начинается в марте и заканчивается в мае [9].

Валаамский архипелаг – группа островов, расположенная в северной глубоководной части Ладожского озера. Архипелаг включает в себя около 50 островов, причем самые большие из них: остров Валаам и остров Скитский. Климат островов морской переходный и определяется Ладожским озером. За счёт Ладоги наблюдается сглаженный ход температур на суше. Самый холодный месяц февраль – температура воздуха $-8,6^{\circ}\text{C}$, самый тёплый июль – $16,7^{\circ}\text{C}$ [9].

4 Материалы и методы исследования

4.1 Описание исходных данных

В качестве исходных данных для выполнения работы использованы результаты измерений температуры воды на различных станциях вокруг Валаамского архипелага, произведенные в течение 2016 года (таблица 4.1), а также данные измерения температуры воды автономным фиксирующим устройством, расположенным в прибрежной части акватории Валаамского архипелага. Данные самописца охватывают период с мая по октябрь 2016 года (таблица 4.2). Измерения выполнялись с периодичностью 20 минут.

Таблица 4.1 – Количество промеров температуры воды на различных станциях вокруг побережья Валаамского архипелага

| № точки | Местоположение | Глубина станции, м | Количество измерений температуры |
|---------|---------------------|-----------------------|--|
| 1 | Залив Крестовый | 24,5 | 30 |
| 2 | Район о. Никольский | 18 | 23 |
| 3 | о. Святой | 42 | 10 |
| 4 | Залив Лещёвый | 35 | 10 |

Таблица 4.2 – Средние значения температуры поверхности воды в заливе Крестовый, полученные с помощью логгеров.

| Месяц | Среднее значение температуры, °С | Максимальное значение температуры, °С | Минимальное значение температуры, °С |
|----------|----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Май | 2,6 | 4,5 | 2,6 |
| Июнь | 5,2 | 13,4 | 4,8 |
| Июль | 15,6 | 21,2 | 3,1 |
| Август | 16,6 | 19,0 | 12,1 |
| Сентябрь | 13,2 | 15,2 | 11,5 |
| Октябрь | 13,0 | 23,6 | 8,2 |

Кроме того, использованы данные дистанционного зондирования Земли, полученные при реализации программы Landsat (таблица 4.3). Использовались снимки, выполненные в мае, июне, июле, августе и сентябре в 2014 – 2016 гг.

Источником открытых материалов дистанционного зондирования является архив Геологической службы (ГС) США (United States Geological Survey). Материалы из архива ГС США находятся в открытом доступе для зарегистрированных пользователей, выполнившие авторизацию на сайте EarthExplorer [11]. Регистрация на сайте бесплатна.

Таблица 4.3 – Исходные данные дистанционного зондирования Земли

| Название сцены | Дата | Время GMT | Облачность, % | Высота солнца |
|-----------------------|----------------|--------------|------------------|------------------|
| LC81850172014137LGN00 | 17.05.201 4 | 09:10:1 5 | 9 | 47 |
| LC81840172014162LGN00 | 11.06.2014 | 09:04:1 4 | 21 | 51 |
| LC81850172014201LGN00 | 20.07.201 4 | 09:10:3 6 | 4 | 48 |
| LC81850172014217LGN00 | 05.08.201 4 | 09:10:4 4 | 5 | 45 |
| LC81840172014258LGN00 | 15.09.201 4 | 09:04:4 1 | 2 | 31 |
| LC81840172015149LGN00 | 29.05.201 5 | 09:03:3 7 | 17 | 49 |
| LC81840172015181LGN00 | 30.06.201 5 | 09:03:5 6 | 19 | 50 |
| LC81850172015236LGN00 | 24.08.201 5 | 09:10:3 0 | 5 | 39 |
| LC81850172016223LGN00 | 15.05.201 6 | 09:10:4 5 | 20 | 43 |
| LC81850172016143LGN00 | 22.05.201 6 | 09:10:1 9 | 23 | 48 |
| LC81840172016184LGN00 | 02.07.201 6 | 09:04:2 4 | 21 | 50 |
| LC81850172016223LGN00 | 10.08.201 6 | 09:10:4 5 | 20 | 43 |
| LC81840172016264LGN00 | 20.09.201 6 | 09:04:4 6 | 9 | 29 |

Данные представлены в виде растровых изображений, пространственным разрешением 30 м, в формате GeoTIFF. Для всех снимков используется система координат WGS84, UTM проекция для 36 зоны.

4.2 Методы прямого измерения температуры воды

В зависимости от цели наблюдений температуру воды измеряют в поверхностном или глубинном слоях. Для измерения температуры воды применяют термометры различных типов: ртутные, ртутные опрокидывающиеся, электрические. Если термометры применяются для измерения температуры воды на поверхности, то они называются поверхностными, а если на той или иной глубине, — глубинными.

Ртутные термометры

Измерение температуры в поверхностном слое водного объекта производят термометром, закреплённым в металлической оправе; при этом термометр на тросе опускают на глубину от 0,2 до 0,5 м от поверхности воды [12].

Глубинный опрокидывающийся ртутный термометр применяют для измерения температуры воды на значительных глубинах; его часто используют при исследовании водохранилищ, озер и морей.

Прибор представляет собой два термометра: основной и вспомогательный. Они скреплены друг с другом и заключены в толстостенную стеклянную трубку. Около ртутного резервуара капилляр термометра сужен и изогнут, вследствие чего при повороте термометра резервуаром вверх часть ртути, прошедшая узкое изогнутое колено, отделяется и падает в противоположный конец капилляра, где имеется расширение, поэтому деления в термометре нанесены от конца капилляра к резервуару.

Высота оторвавшегося столбика ртути показывает температуру воды в момент опрокидывания. Из-за того, что производить отсчет приходится в воздухе при иной температуре, то в показание глубинного термометра

необходимо ввести поправку, которую вычисляют по показанию вспомогательного термометра.

Глубинный термометр заключен в металлическую гильзу и помещается в специальную металлическую раму, при помощи которой он опрокидывается. Поворот рамы термометра происходит вокруг горизонтальной оси за счёт действия пружины, заключенной в коробке. От вращения термометр первоначально удерживается прижимаемым пружиной рычагом, конец которого входит в углубление, сделанное в обойме термометра. Посредством зажима и направляющего кольца термометр прикрепляется к тросику. Посыльный груз, скользящий по тросику, ударяет по рычагу, разъединяет сцепление, и рама с термометром опрокидывается.

Электрические термометры

Электрические термометры подразделяются на термометры сопротивления и термоэлектрические.

Термометр сопротивления устроен следующим образом. Металлическая проволока диаметром 0,03—0,04 мм, сопротивлением 50—100 ом наматывается на кварцевую трубочку, изолированную от воды посредством другой кварцевой трубочки с запаянным концом. Концы проволоки идут к двум клеммам, которые могут быть присоединены к измерительному прибору. При измерении температуры пользуются мостиком сопротивления. Кроме металлической проволоки, применяют также полупроводники; в этом случае термометры называют термисторами. В отличие от проводников (металлов), сопротивление полупроводников уменьшается с ростом температуры, и поэтому термисторы значительно более чувствительны к изменениям температуры; при нагреве полупроводников на 1° сопротивление понижается на 3—6 % (а в металлах при нагреве на 1° сопротивление повышается на 0,3—0,4 %).

Точность измерения температуры воды электрическими термометрами может быть доведена до $0,01 - 0,001^\circ\text{C}$ [13].

Автоматические регистраторы температуры

Логгеры (регистраторы, самописцы) температуры представляют собой электронные устройства на автономном питании для измерения и записи температуры, давления, расхода, влажности и пр. Основное применение логгеров - измерение и запись физических параметров на удаленных объектах. Логгеры являются заменой устаревшим бумажным самописцам, так как они неприхотливы, не имеют расходных материалов, таких как бумага, и не требуют подключения к внешнему питанию. Логгеры отличаются от других электронных измерительных устройств, тем, что логгер не требует постоянного подключения к компьютеру для передачи данных. Подключение к компьютеру можно производить периодически в зависимости от потребности считать накопившиеся данные или для перепрограммирования логгеров. Считанные данные помещаются в базу данных на компьютере пользователя или сервере, позволяя создавать отчеты, таблицы и графики на их основе.

4.3 Программное обеспечение, использованное для обработки исходных данных

Большая часть обработки исходных данных была произведена с помощью географических информационных систем QGIS и SAGA GIS.

QGIS – свободная кроссплатформенная геоинформационная система. Данная система была основана на программном обеспечении GRASS GIS в 2002 году и написана на языках программирования C++ и Python с целью упрощения процесса использования геоинформационных систем. С помощью QGIS возможно работать с векторными и растровыми данными в различных форматах и проекциях. Также удобный графический интерфейс позволяет создавать карты и исследовать пространственные данные с помощью множества инструментов. Данная программа является бесплатной и может быть скачана любым пользователем с сайта разработчика.

SAGAGIS (System for Automated Geoscientific Analyses) – это проект, разработанный в Геттингенском университете (Goettingen Univerisity) в Германии в конце 1990-х годов на основе программного обеспечения DiGeM.

SAGA относится к программному обеспечению с открытым исходным кодом, что позволяет бесплатно использовать её для любых собственных целей, беспрепятственно распространять копии, публиковать производные продукты.

С помощью данной программы возможно работать с различными форматами файлов геоданных. Основными типами данных в SAGA являются векторные (shapes), растровые (grids), табличные (tables) и картографические (maps, layouts) данные.

В состав данной системы входит большая группа библиотек для обработки растровых данных. Здесь есть всевозможные модули анализа и вычислений (интересный модуль Grid Calculator для выполнения различных арифметических и логических операций с произвольным количеством растров), фильтрации, гридинга, интерполирования, дополнения, разделения и визуализации данных (в том числе и трехмерной).

4.4 Определение температуры по данным спутниковых снимков.

Данные, полученные с помощью сенсоров системы Landsat-8, состоят из 11 спектральных диапазонов. К дальним инфракрасным каналам относятся 10 и 11, которые и являются исходными данными для определения температуры. Пример исходных данных представлен в приложении А.

Первым этапом обработки данных дистанционного зондирования является обрезка векторной маской. Эта операция необходима для уменьшения размера исходных снимков, каждый из которых представляет собой 64 МПиксельный растровый файл. Обрезка выполняется при помощи модуля программы SAGA: Geoprocessing\ Shape\ Grid\ Spatial Extent\ Clip Grid With Polygone.

Следующий этап обработки данных называется радиометрической калибровкой. Он заключается в пересчете данных из условных единиц яркости в реальные физические единицы измерения [14].

Эта операция выполняется в калькуляторе растров SAGAGIS, который вызывается при помощи модуля Geoprocessing\ Grid\ Calculus\ GridCalculator

Радиометрическая калибровка выполняется по формуле:

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L, \quad (4.1)$$

где M_L и A_L – константы, специфические для каждого растра, указанные в файле метаданных, прилагающемся к каждой сцене Landsat, Q_{cal} – исходное значение яркости.

Используя калиброванные данные 10 и 11 канала Landsat-8 можно вычислить значения температуры поверхности по формуле:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)} - 273.15, \quad (4.2)$$

где K_1 и K_2 – константы, указанные в файле метаданных.

Расчеты выполняются последовательно, отдельно для 10 и 11 канала и с помощью калькулятора растров вычисляется их среднее значение и получается итоговый файл, который сохраняется в формате GeoTIFF. Пример результатов обработки данных представлен в приложении Б.

5 Пространственное распределение температуры воды Ладожского озера в районе Валаамского архипелага летом 2016 года

5.1 Особенности вертикального распределения температуры воды в прибрежной зоне Валаамского архипелага

Для того чтобы понять закономерность вертикального распределения температуры воды были использованы результаты прямых измерений, выполненные в рамках мониторинговых наблюдений Учебно-научной станции «Валаам» и во время проведения учебно-производственной практики студентов РГГМУ в 2016 г.

На рисунке 5.1 показаны кривые распределения температуры воды измеренной в районе северного побережья о. Валаам, на выходе из Монастырской бухты у о. Никольский.

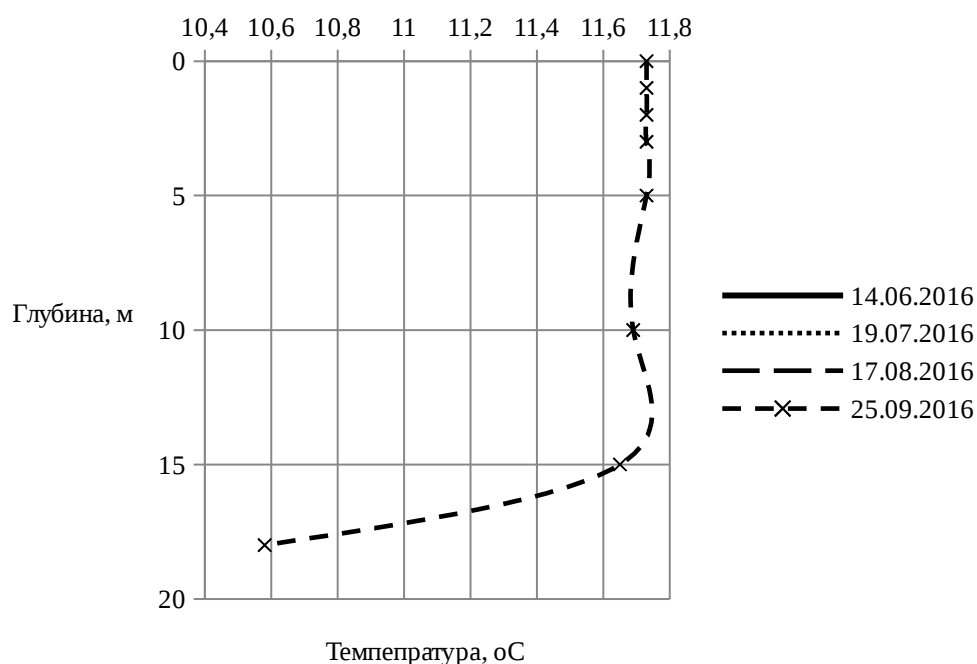


Рисунок 5.1 – Вертикальное распределение температуры у о. Никольский

Как видно из рисунка 5.1 в исследуемой акватории с наступлением теплого периода года образуется верхний однородный слой, мощность которого со временем увеличивается. Наиболее мощный однородный слой наблюдается в сентябре.

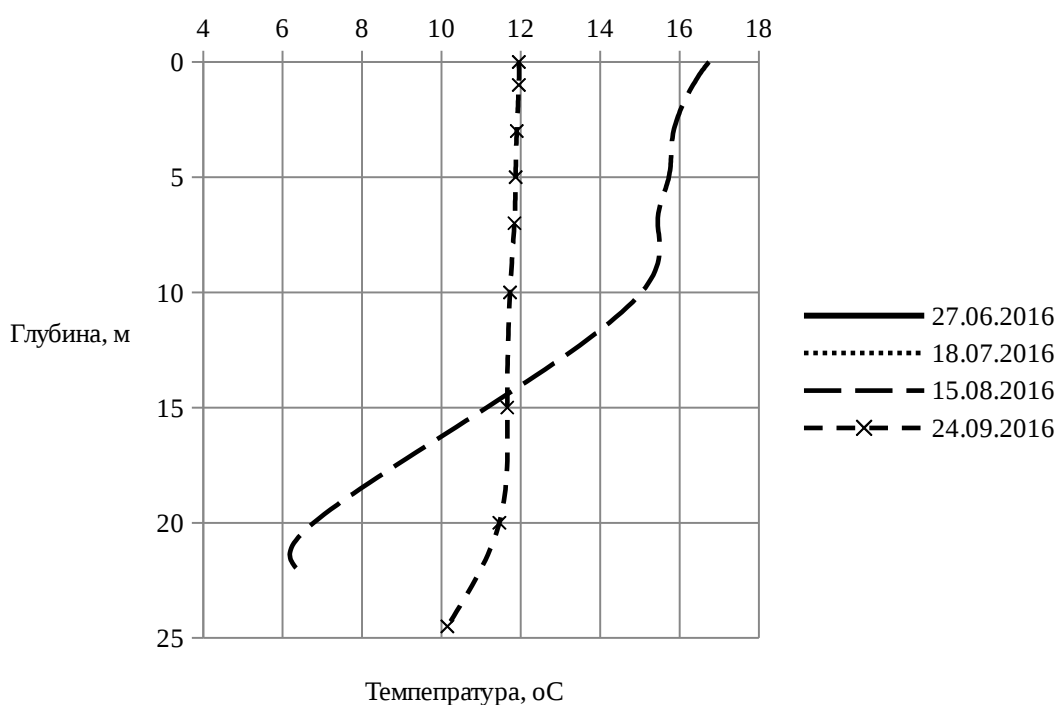


Рисунок 5.2 – Вертикальное распределение температуры залива Крестовый

На рисунке 5.2 представлены кривые распределения температуры с глубиной в районе западного побережья о. Валаам – у мыса Крестовый. На этом рисунке видна сходная картина формирования верхнего термически-однородного слоя. Кроме того можно отметить, что верхний горизонт мощностью 5 м обладает однородным распределением температуры для всех четырёх месяцев наблюдений.

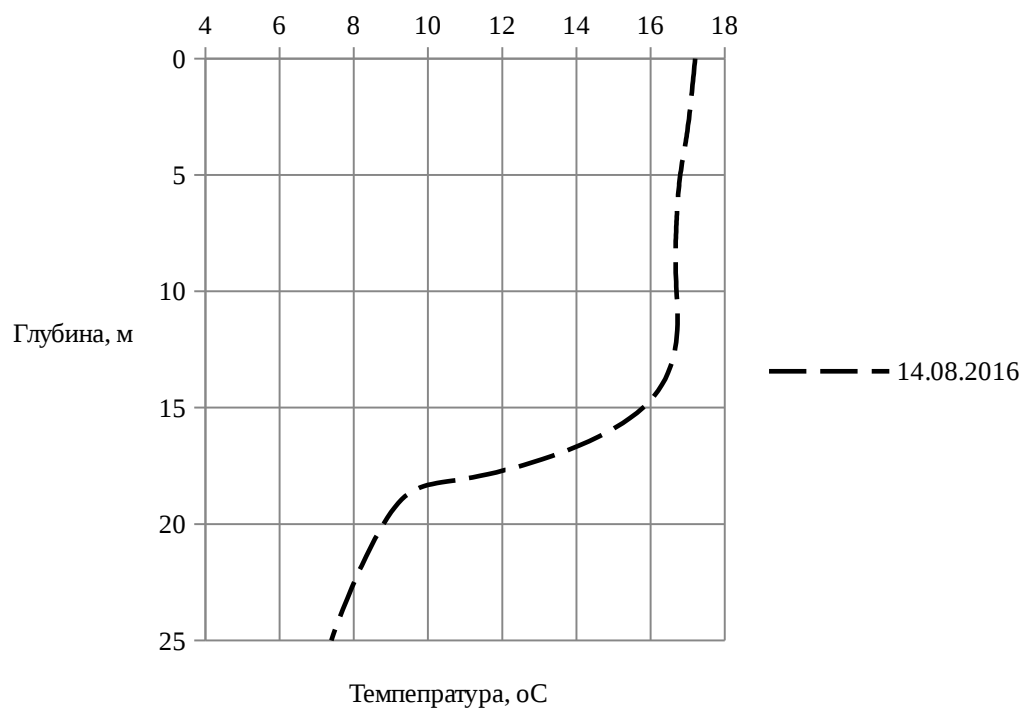


Рисунок 5.3– Вертикальное распределение температуры в районе о. Святой

На рисунках 5.3 и 5.4 представлены однократные измерения температуры воды, выполненные в период максимального прогрева воды (середина июля 2016 г.) в двух точках – в восточной части архипелага (о. Святой) и южной части (залив Лещовый).

На станции в районе о. Святой видно, что от поверхности до глубины 15 м образуется однородный слой водной массы с температурой воды около 17 °С.

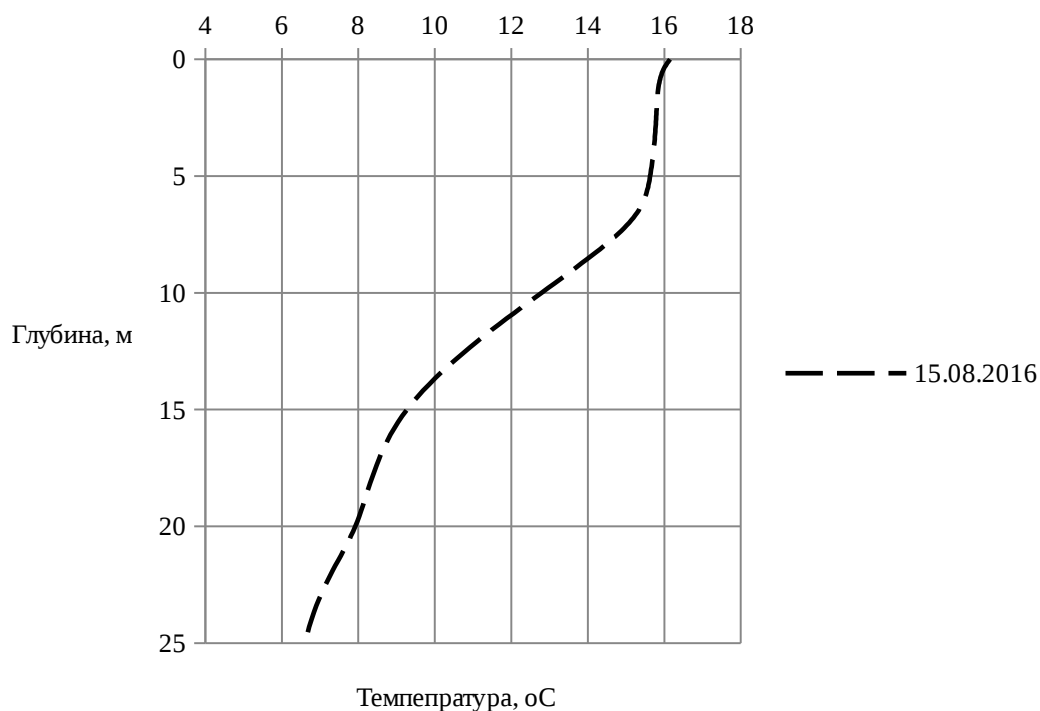


Рисунок 5.4– Вертикальное распределение температуры залива Лещовый

Для точки расположенной в районе Лещового залива также отмечается образование однородного температурного слоя до глубины 7 метров.

5.2 Определение температуры воды на основе данных дистанционного зондирования.

Для анализа пространственного распределения температуры воды была выполнена обработка космических снимков в инфракрасном диапазоне длин волн, полученных в рамках программы Landsat. В результате обработки снимков были построены карты температуры за различные даты.

На акватории прибрежной зоны Валаамского архипелага были выбраны четыре точки, совпадающие со станциями в которых производились измерения температуры воды на различных горизонтах (рисунок 5.5).

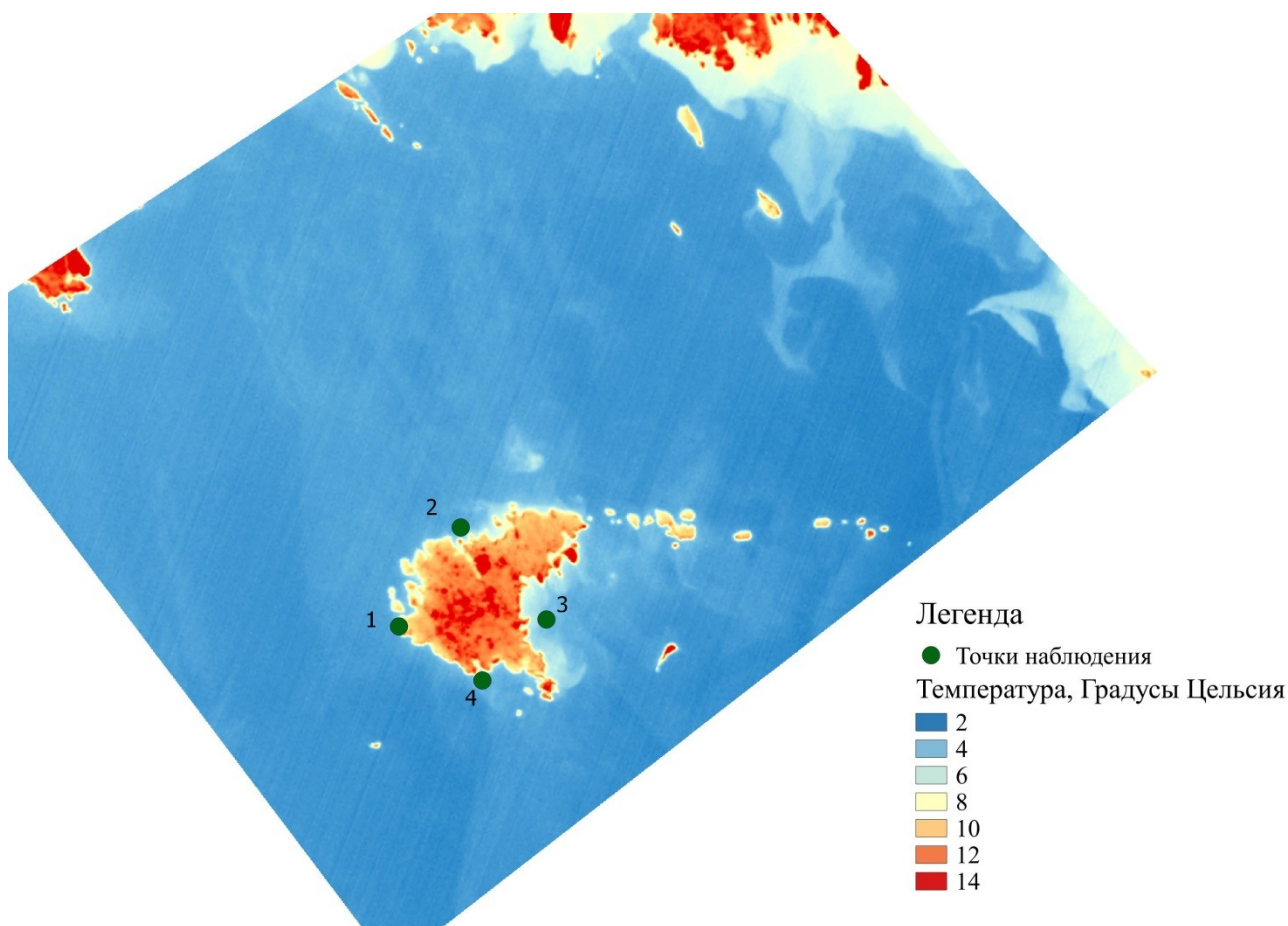


Рисунок 5.5 – Карта пространственного распределения температуры поверхности в районе Валаамского архипелага за 22 мая 2016 г; точки наблюдения: 1 - залив Крестовый, 2 - о. Никольский, 3 - о. Святой, 4 - залив Лещёвый

Для того чтобы сравнить условия прогрева исследуемой акватории, была вычислена температура воды в этих точках для каждого снимка. Кроме того, для оценки влияния метеорологических условий конкретного года выполнены расчеты для трех лет с 2014 по 2016 гг. Результаты представлены на рисунках 5.6 – 5.8.

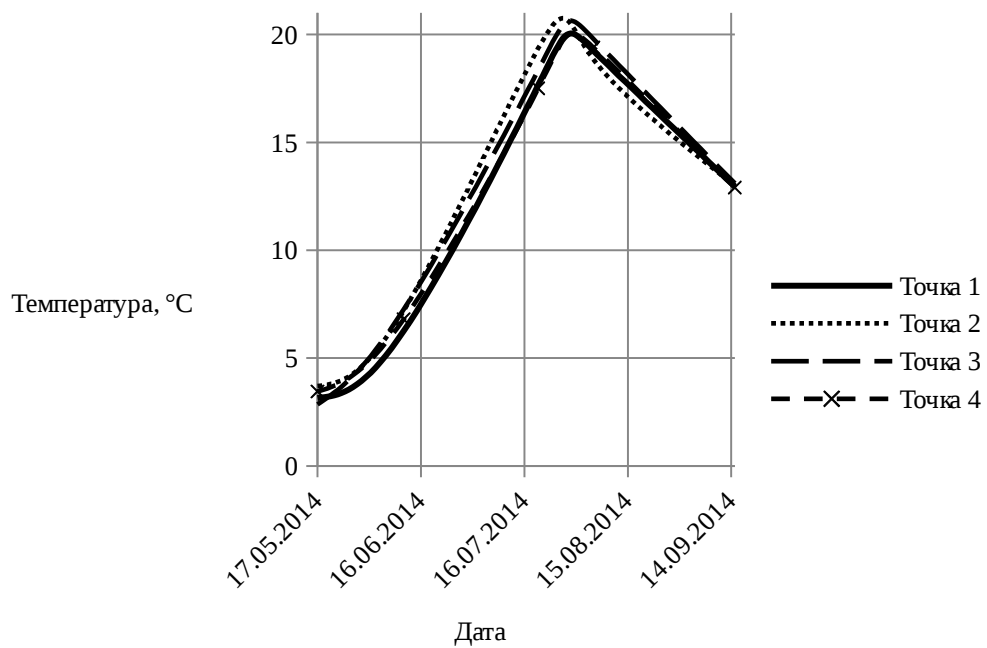


Рисунок 5.6 – Температура поверхности воды в точках наблюдения с мая по сентябрь 2014 года

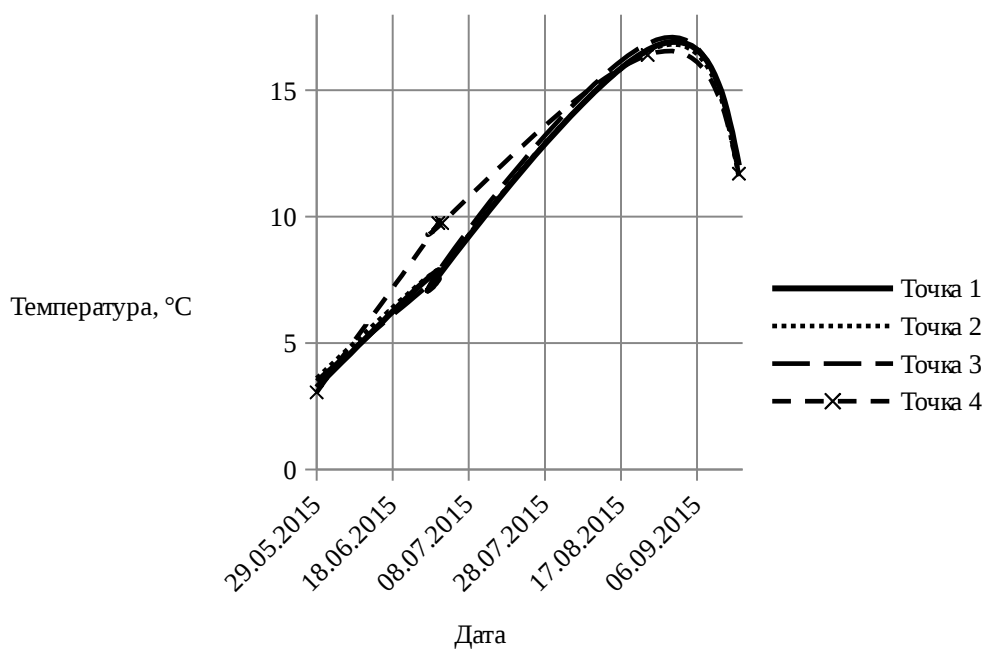


Рисунок 5.7 – Температура поверхности воды в точках наблюдения с мая по сентябрь за 2015 года

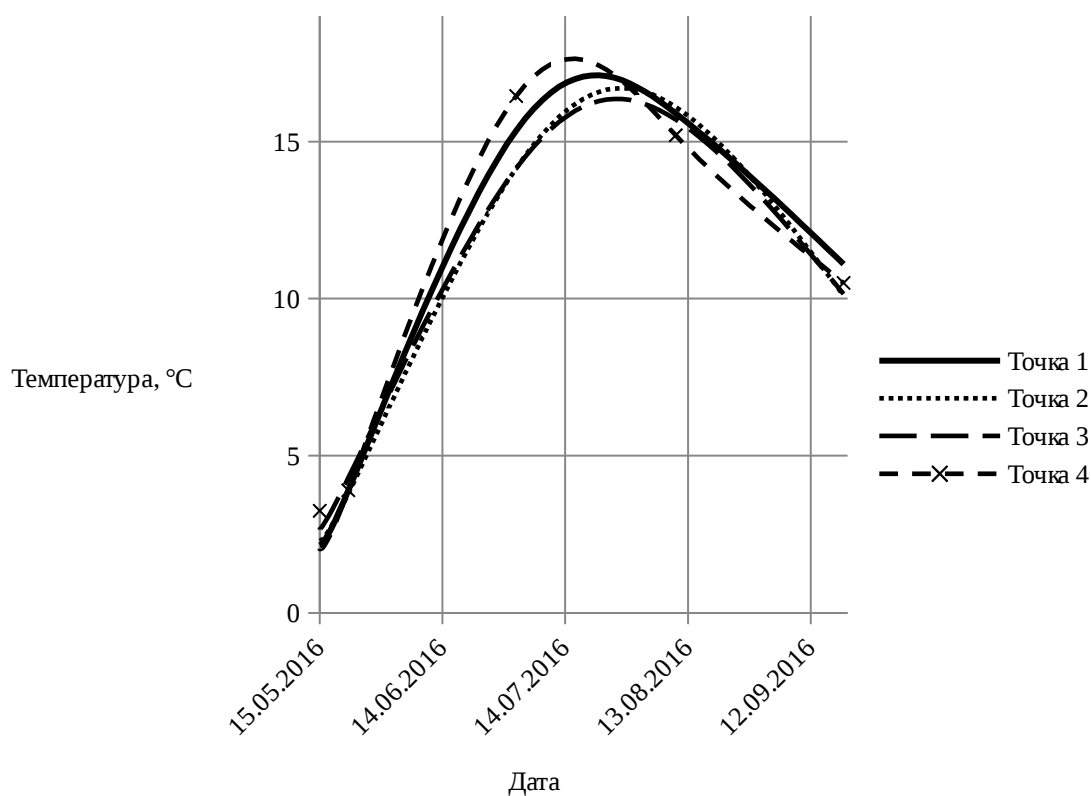


Рисунок 5.8 – Температура поверхности воды в точках наблюдения с мая по сентябрь за 2016 года

Как видно из рисунков, в каждый конкретный год прогрев поверхностного слоя воды происходил равномерно для различных участков акватории Валаамского архипелага. Различие между рассмотренными годами состояло в сдвиге максимума температуры и величине этого максимума. Так в 2014 году наибольшее значение температуры поверхности отмечалось в районе 20 °С, а в 2015 и 2016 гг. – порядка 17 °С. В 2014 году максимум наблюдался в середине августа, а 2015 г. – в начале сентября, а в 2016 г. – в середине июля.

5.3 Оценка температуры верхнего термически однородного слоя воды на основе данных дистанционного зондирования

С целью сравнения результатов прямых измерений температуры воды и результатов обработки данных дистанционного зондирования были использованы данные, полученные с самописца, фиксировавшего температуру воды в поверхностном горизонте в районе мыса Крестовый. Результаты сравнения приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Сравнение температур, измеренных прямым и дистанционным методами в заливе Крестовый

| Дистанционное зондирование | | Прямые измерения | |
|----------------------------|-------------|------------------|-------------|
| Дата | Температура | Дата | Температура |
| 15.05.201 6 | 3,0 | 15.05.2016 | 3,1 |
| 22.05.201 6 | 3,9 | 22.05.2016 | 3,4 |
| 02.07.201 6 | 15,3 | 02.07.2016 | 14,7 |
| 10.08.201 6 | 16,2 | 10.08.2016 | 17,5 |
| 20.09.201 6 | 11,1 | 20.09.2016 | 12,7 |

Из данных, представленных в таблице выше, видно, что по сравнению с прямыми измерениями, значения температур, полученных в результате обработки спутниковых снимков, имеют некоторое отличие в пределах 1 – 1,5 °С. Выявленное различие может быть связано с различными причинами, в первую очередь с метеорологическими особенностями в момент выполнения съемки.

При оценке температурного распределения больших площадей и объёмов воды данная погрешность вероятно должна считаться допустимой. Однако если требуется большая точность, необходимо учитывать дополнительные параметры, такие как влажность, давление и наличие аэрозолей, которые могут повлиять на результаты оценки температуры по данным спутниковой съёмки.

Данные измерений температуры воды, представленные на рисунках 5.1 – 5.4 показывают, что для станций расположенных в открытой части ладожского побережья Валаамского архипелага, начиная с середины лета, характерно наличие верхнего термически однородного слоя воды. В начале летнего сезона также не имеется значительных градиентов температур. Сначала происходит перемешивание всей водной массы при достижении температуры 4 °С, а потом начинается быстрое формирование верхнего термически однородного слоя воды.

По данным Учебно-научной станции «Валаам» прозрачность воды в этой части Ладожского озера составляет от 5 м (весна – начало лета) до 2,5 – 3 м. Таким образом, примерную мощность фотического слоя можно оценить как 7 – 12 м. По проанализированным данным видно, что большую часть исследованного периода года разница температур на верхней и нижней границах этого слоя незначительна. Следовательно, имеется возможность использовать карты распределения температуры, полученные по данным дистанционного зондирования для оценки температуры всего фотического слоя воды.

5.4 Разработка модели анализа данных для автоматизированного вычисления температуры на основе данных дистанционного зондирования

С целью автоматизации большинства ранее описанных этапов выполнения работы по составлению карт распределения температуры и для того чтобы облегчить использование предложенного способа оценки температуры фотического слоя воды по другим данным, в QGIS была разработана модель анализа. Модель анализа представляет собой последовательность действий, выполняемых ГИС, записанную в виде блок-схемы в специальном модуле. Этот модуль позволяет описывать часто повторяющиеся последовательности действий над растровыми и векторными данными в виде алгоритма, который может быть применен к разным наборам исходных данных.

Использование таких моделей позволяют автоматизировать процесс расчетов, в результате чего появляется возможность применения этого алгоритма расчетов для любого интересующего нас региона. Общий вид схемы модели анализа приведен в приложении В.

Модель состоит из трех основных типов блоков:

1. Блоки с исходными данными:
 - Блоки с числовым типом значения для хранения констант;
 - Блоки с растровыми значениями, представляющих исходные данные Landsat;
 - Слой векторный маски для обрезки исходных данных.
2. Алгоритмы вычисления:
 - Блоки обрезки растровых слоев;
 - Блоки радиометрической калибровки;
 - Блок вычисления температуры.
3. Блок, содержащий результат вычислений температуры.

Заключение

Температура воды является важнейшим фактором среды, оказывающим непосредственное воздействие на жизнь водных организмов. Она воздействует на них как прямо, так и косвенно – через изменение плотности и растворимости солей и газов.

Данная работа была посвящена изучению методов оценки пространственного распределения температуры воды Ладожского озера в районе Валаамского архипелага.

В процессе выполнения работы была подробно рассмотрена роль температуры как экологического фактора, в результате чего определены особенности температурного режима, которым должно быть уделено особое внимание.

Также были рассмотрены способы дистанционного измерения температуры поверхности озера. Были изучены и описаны методы локального измерения температуры воды и рассмотрена взаимосвязь методов измерения температуры.

С использованием открытых данных дистанционного зондирования Земли и свободно-распространяемого программного обеспечения построена серия карт пространственного распределения температуры воды для исследуемой акватории. Результаты были сопоставлены с данными мониторинговых наблюдений, выполняющихся в рамках научных программ учебно-научной станции «Валаам» РГГМУ.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

Для оценки пространственного распределения температуры воды и создания наиболее информативной модели термического режима озера большой площади, при экологическом или гидрологическом моделировании, могут быть использованы совмещённые способы измерения температуры.

Данные, за определенные периоды года, полученные с помощью аэрокосмической съёмки можно эффективно использовать при проведении различных гидробиологических исследований, так как они одновременно дают представление о распределении температуры в поверхностном слое воды в любой точке исследуемой акватории.

Вся последовательность действий по построению карт распределения температуры поверхности на основе данных дистанционного зондирования была описана в виде модели анализа, реализованной в специальном модуле открытой ГИС системы – QGIS. Созданная модель может быть использована для построения подобных карт для любого участка водной поверхности, для которого существует набор снимков системы Landsat соответствующего качества.

Основные результаты работы:

1. На основе данных дистанционного зондирования Земли показаны закономерности прогрева верхнего слоя воды Ладожского озера в районе Валаамского архипелага;
2. Обработаны данные измерения температуры воды на различных горизонтах четырех станций, расположенных в разных частях исследуемой акватории и показаны закономерности прогрева воды;
3. На основе выявленных закономерностей прогрева водной массы, показано наличие возможности использования карт пространственного распределения температуры поверхности воды для оценки температуры фотического слоя;

4. Разработана модель анализа, позволяющая повторить всю последовательность действий по созданию карт температуры поверхности на любом наборе исходных данных.

Полученные результаты и выявленные закономерности можно использовать в дальнейшем для оценки значения температуры при проведении различных гидробиологических или гидрохимических исследованиях, при отсутствии прямых измерений температуры воды.

В дальнейшем, предложенный метод определения температуры может быть усовершенствован путем добавления в него блоков, учитывающих состояние атмосферы и ветровое воздействие.

Список использованных источников

1. Бояринов П.М, Петров М.П. Процессы формирования термического режима глубоких пресноводных водоемов.-Л.: Наука, 1991.-176 с.
2. Дроздов В.В. Общая экология, Учебное пособие. - СПб.: РГГМУ, 2011. - 412 с.
3. Зилов Е.А. Гидробиология и водная экология. Учебное пособие. – Иркутск: Иркут.ун-т, 2007
4. [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://ozera.info/lakes/about/science/limnology/thermal-bar>
5. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. Москва: Техносфера, 2010. – 560 с., 32 с. Цв. Вкл. ISBN 978-5-94836-244-1
6. [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://gis-lab.info/qa/thermal.html>
7. [Электронный ресурс]: Sharing Earth Observation Resources. – Режим доступа: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/l/landsat-8-ldcm>
8. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов Под ред. Г С. Кондратенкова.—М.: «Радиотехника», 2005. — 368 с
9. Ладожское озеро. Прошлое, настоящее, будущее / Под ред. В.А. Румянцева и В.Г. Драбковой. Ин-т озероведения – СПб.: Наука, РАН. 2002. - 327 с.
10. Ладожское озеро – Критерии Состояния экосистемы/ Под ред. Н. А. Петровой, А. Ю. Тержевика . – СПб.: Наука, 1992. – 328 с.
11. [Электронный ресурс].– Режим доступа: earthexplorer.usgs.gov
12. РД 52.24.496-2005. Температура, прозрачность и запах поверхностных вод суши. Методика выполнения измерений

13. Е.В. Близняк. Гидротехнические сооружения, М.: ГИЗЛ по строительству и архитектуре, 1955. – 828 с
14. [Электронный ресурс].– Режим доступа: <https://landsat.usgs.gov/using-usgs-landsat-8-product>

Приложение А

Исходные данные

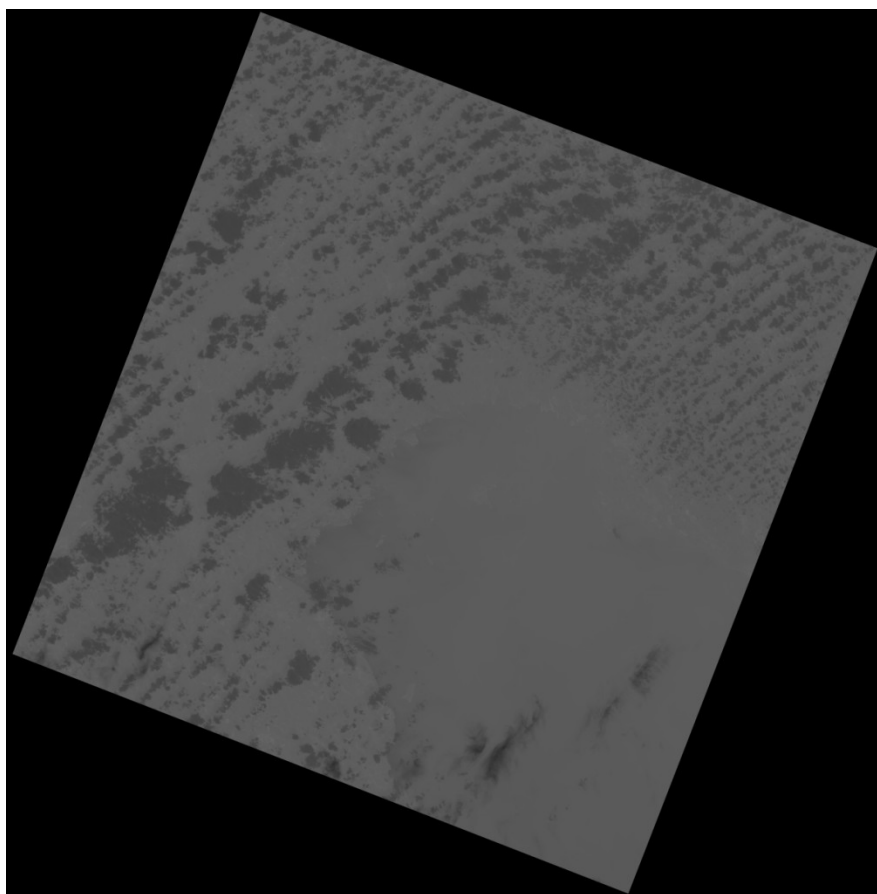


Рисунок А1 - Пример исходных данных, полученных методом дистанционного зондирования Земли за 10 августа 2016 г

Приложение Б

Результат обработки исходных данных

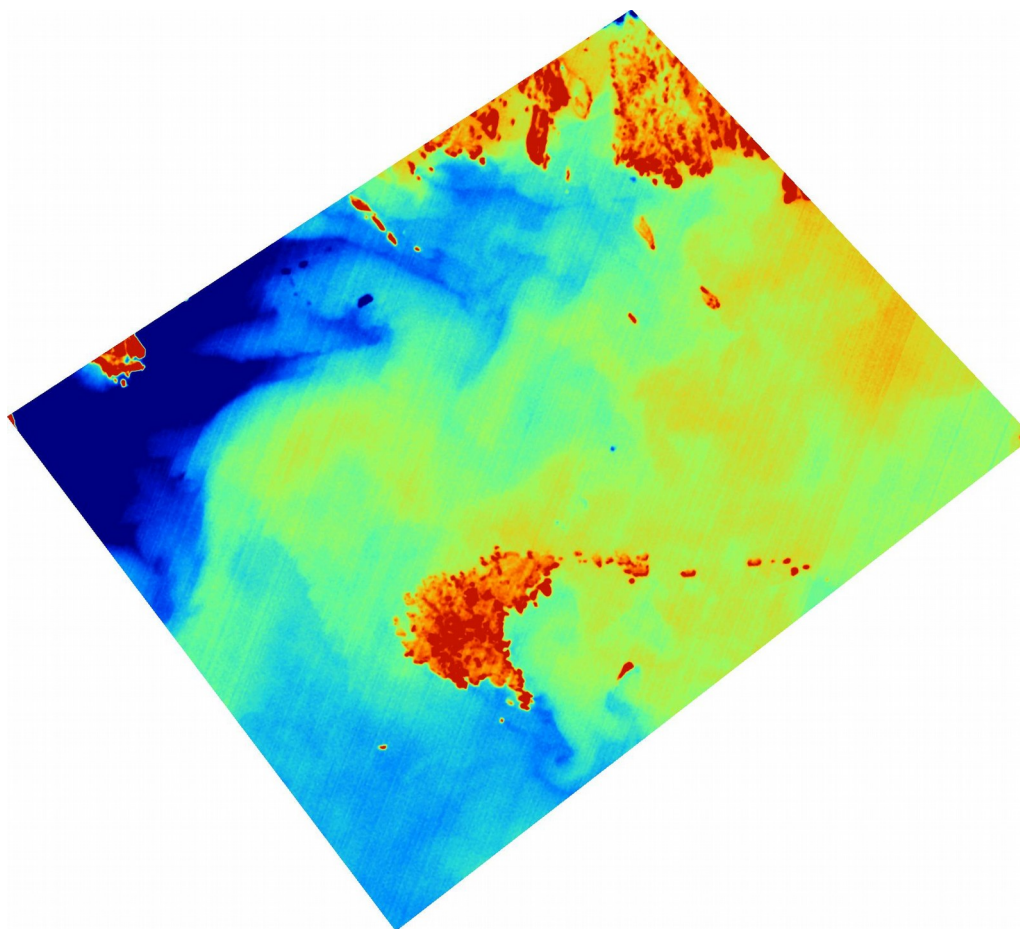


Рисунок Б1 - Результат радиометрической калибровки исходных данных в программе SAGAgis, сохранённые в формате JPEG

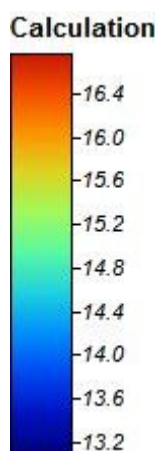


Рисунок Б2 - Результат радиометрической калибровки исходных данных в программе SAGAgis, сохранённые в формате JPEG

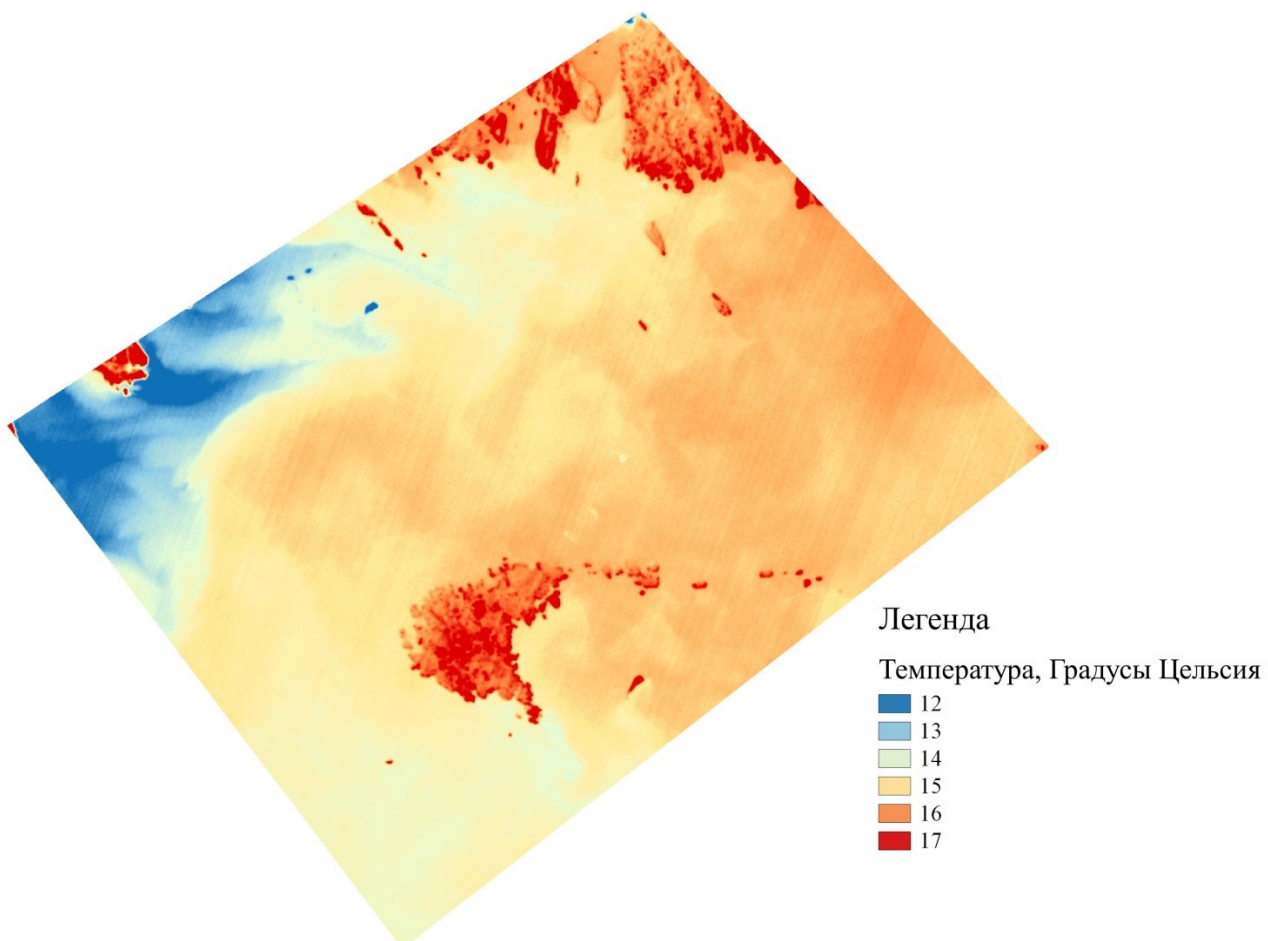


Рисунок Б3 – Конечный результат обработки исходных данных в программе SAGAgis и Qgis

Приложение В

Схема модели анализа

