



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра экспериментальной физики атмосферы

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(бакалаврская работа)

На тему: «Исследование боры на озере Байкал»

Исполнитель Баймухаметов Алибек Ерболович  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук, доцент  
(ученая степень, ученое звание)

Федосеева Наталья Владимировна  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
заведующий кафедрой

  
(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент  
(ученая степень, ученое звание)

Восканян Карина Левановна  
(фамилия, имя, отчество)

«09 » июня 2024 г.

Санкт-Петербург  
2024

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| СОКРАЩЕНИЯ.....                                             | 2  |
| ВВЕДЕНИЕ.....                                               | 3  |
| 1. ВЕТРЫ В ГОРНЫХ РАЙОНАХ .....                             | 5  |
| 1.1. Местный ветер.....                                     | 5  |
| 1.1.1. Катабатические ветра.....                            | 5  |
| 1.1.2. Анабатические ветра.....                             | 8  |
| 1.1.3. Горно-долинный ветер.....                            | 9  |
| 1.1.4. Стоковый ветер.....                                  | 11 |
| 1.1.5 Фён.....                                              | 13 |
| 2.БОРА.....                                                 | 14 |
| 2.1. Бора в Новороссийске.....                              | 18 |
| 2.2. Новоземельная бора.....                                | 19 |
| 2.3. Байкальская бора.....                                  | 20 |
| 2.3.1. Исторические случаи боры на Байкале.....             | 28 |
| 2.3.2. Формирование боры на Байкале.....                    | 31 |
| 3. ИССЛЕДОВАНИЕ БОРЫ НА БАЙКАЛЕ.....                        | 31 |
| 3.1. Анализ байкальской боры.....                           | 35 |
| 3.2 Формирование архива и расчет чисел Фруда и Бюргеге..... | 37 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                                            | 51 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....                        | 53 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А.....                                           | 55 |

## СОКРАЩЕНИЯ

СДЗ - спутниковое дистанционное зондирование

МСК - московское время

с.ш. - северная широта

в.д. - восточная долгота время

гг. - годы гПа - гектопаскаль

км - километр

м - метр

км/ч - километров в час

м/с - метр в секунду

°С - градус Цельсия

ЧФ - число Фруда

ЧБ - число Бюргера

## ВВЕДЕНИЕ

Байкальская бора – уникальное природное явление, вызывающее сильные порывы ветра на западном берегу озера Байкал. Важно понимать особенности этого формирования для более глубокого изучения его влияния на окружающую среду и климата данного региона. Современные методы исследования, включая анализ спутниковых снимков и использование аэрологических данных, предоставляют ценные сведения для изучения боры.

Целью данной работы является комплексное исследование явления байкальской боры на западном берегу озера Байкал с применением современных методов анализа.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи

1. Сформировать архив спутниковых радиолокационных снимков Байкальской боры.
2. Сформировать архив аэрологических данных с целью определения частоты, временных рамок и климатических условий возникновения байкальской боры.
3. Проанализировать сезонное распределение случаев боры.
4. Исследовать гидродинамические характеристики боры, основываясь на расчете чисел Фруда и Бюргера, для выявления ключевых факторов, влияющих на формирование боры.
5. Оценить влияние горного рельефа западного берега озера Байкал на формирование и интенсивность боры, используя число Бюргера
6. Изучить взаимодействие климатических факторов, таких как скорость и направление ветра, температура и влажность.

Достижение поставленных целей позволит углубить понимание механизма образования байкальской боры.

ВКР содержит список сокращений, введение, 3 главы и заключение, а также списка использованной литературы и приложений.

В первой главе описываются типы ветров, которые непосредственно относятся к горным.

Вторая глава посвящена описанию бороподобных ветров, в частности, трех наиболее известных на территории нашей страны: новороссийской, байкальской и новоземельской.

Третья глава работы посвящена исследованию байкальской боры, а именно западный ветрам Байкала.

## 1. ВЕТРЫ В ГОРНОЙ МЕСТНОСТИ

### 1.1. Местный ветер

Местный ветер — является ветром, дующим на ограниченной территории, обусловленный особенностями погодных условий или географическим расположением данной местности. Местные ветры дуют регулярно и обычно характеризуются определенным направлением и силой. Он может быть результатом[7]:

- Взаимодействия общего круговорота атмосферы с местным ландшафтом (фен, бора, ветры горных перевалов).
- Проявления локальной циркуляции, независимой от общей циркуляции (бризы, горно-долинные ветры).
- Осложнения общего круговорота специфическими, уникальными для данного региона явлениями, такими как высокая температура воздуха или запыленность (афганец, буран, сирокко, хамсин).
- Проявления мощных конвективных явлений в атмосфере, иногда вихревого характера (вихри, пыльные бури).

Горно-долинные, фён, бриз и бора, все эти ветра являются разновидностью местного ветра.

#### 1.1.1. Катабатические ветра

Катабатический ветер - это сильный, устойчивый и холодный ветер, дующий с горных вершин вниз по склонам. Он образуется в результате охлаждения воздуха на больших высотах, что приводит к увеличению его плотности и давления. Затем этот холодный воздух стекает вниз по склонам, создавая сильный ветер.

| Ветер    | Генетическая характеристика                       |                                                                                                               | Морфологическая характеристика                                                                                    |                                                   | Общепринятое определение                                          |
|----------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
|          | Особенность топографии                            | Особенность возникновения основной циркуляции                                                                 | Пространственно-кинематическая                                                                                    | Временная                                         |                                                                   |
| Фён      | Горные хребты                                     | Механическое, непериодическое, при обтекании горного препятствия в вертикальной плоскости                     | Нисходящие потоки умеренной силы и значительной вертикальной мощности                                             | Непериодический ветер                             | Теплый и сухой ветер, дующий со стороны гор                       |
| Бора     | Невысокие горные хребты на берегах морей или озер | Механическое, непериодическое, при сужении воздушного потока в вертикальной плоскости и падении его по склону | Нисходящие потоки большой и очень большой силы и малой вертикальной мощности. Уменьшение скорости ветра с высотой | Непериодический ветер, иногда усиливающийся ночью | Холодный, очень сильный ветер, дующий с невысокого берега на море |
| Стоковый | Покрытые материковым льдом протяженные склоны     |                                                                                                               |                                                                                                                   |                                                   |                                                                   |

Рисунок 1.1.1.1 - Виды кататических ветров

Кататические ветры обычно отличаются более низкой температурой, так как они несут с собой более холодный воздух, хотя в целом он холодный, но кататические ветры также могут быть теплыми или жаркими. Это происходит потому, что по мере того, как воздух движется вниз и сжимается, он нагревается. Скорость кататического ветра может быть различной, от легкого бриза до бушующего урагана, и часто увеличивается с уклоном склона и разницей температур.

Кататические ветры имеют различные механизмы формирования, тем не менее их обычно делят на две основные категории: стоковые ветры, возникающие из-за гравитационного стока воздуха, который усиливается локально барическим переносом, а также ветра, образующиеся при взаимном воздействии потока воздуха с неровностью местности, который приводит к сжатию[1].

Кататические ветры - это мощные потоки холодного воздуха, стекающие с горных плато и вершин вниз, к поверхности земли или воды. Они могут вызывать резкие перепады температуры, погодные условия и даже приводить к значительным повреждениям инфраструктуры.

Одним из известных кататических ветров является "Оно" и "эльвегуст" в Норвегии, которые могут достигать скорости до 100 км/ч и вызывать резкое понижение температуры. В Рио-де-Жанейро, Бразилия, кататический ветер "терре-альтос" спускается с плато Серра-ду-Мар и приносит прохладу в жаркий городской климат. В Калифорнии, США, кататический ветер "диабло" может вызывать повышение температуры до 38°C и снижение влажности, что увеличивает риск возникновения лесных пожаров. На побережье Байкала, Россия, кататический ветер "сарма" может достигать скорости до 50 м/с и вызывать резкие колебания уровня воды в озере. "Мистраль" - кататический ветер, который дует в

западной части Средиземноморья, особенно вдоль побережья Франции, и может достигать скорости до 100 км/ч. В Новороссийске, Россия, и на Адриатическом побережье кatabатический ветер "бора" может достигать скорости до 200 км/ч и вызывать значительные повреждения инфраструктуры. В Сербии кatabатический ветер "кошава" дует из Карпатских гор и может достигать скорости до 140 км/ч, вызывая значительные перепады температуры. В Македонии кatabатический ветер "вардарец" дует из горного массива Шар-Планина и может достигать скорости до 120 км/ч, вызывая резкое понижение температуры. В Карпатах кatabатический ветер "немерэ" дует из горных вершин и может достигать скорости до 100 км/ч, вызывая резкие перепады температуры и погодные условия. На Ближнем Востоке кatabатические ветры "наши", "белат" и "шималь" могут вызывать песчаные бури и значительные перепады температуры(рисунок 2.4.).

### 1.1.2. Анабатические ветра

Анабатический ветер - является ветром который дует ввысь по склонам долин(Рис. 1.1.2.1.). Ветер образуется днем, преимущественно там, где солнечные лучи освещают одну сторону долины. Это нагревает воздух на склоне, который затем поднимается, часто формируя кучевые облака над вершиной хребта, когда теплый, влажный воздух остывает. В верхней части восходящего потока формируется четкая дымка, почти всегда на той же высоте, что и ближайшие вершины[16].



Рисунок 1.1.2.1. Анабатический ветер[16]

### 1.1.3 Горно-долинный ветер

«Горно-долинные ветры представляют собой характерное климатическое явление, присущее горным регионам. Данный ветер является смесью кататического(1.1.1) и анабатического(1.1.2) ветров. Они образуются в результате разницы температур воздуха между дневным и ночным временем суток. Днем ветер поднимается вверх по долинам и горным склонам(рисунок 1.1.2.2), а ночью его направление меняется, и он

дует вниз как горный ветер(рисунок 1.1.2.3). Таким образом, горно-долинные ветры меняют своё направление дважды в сутки.»

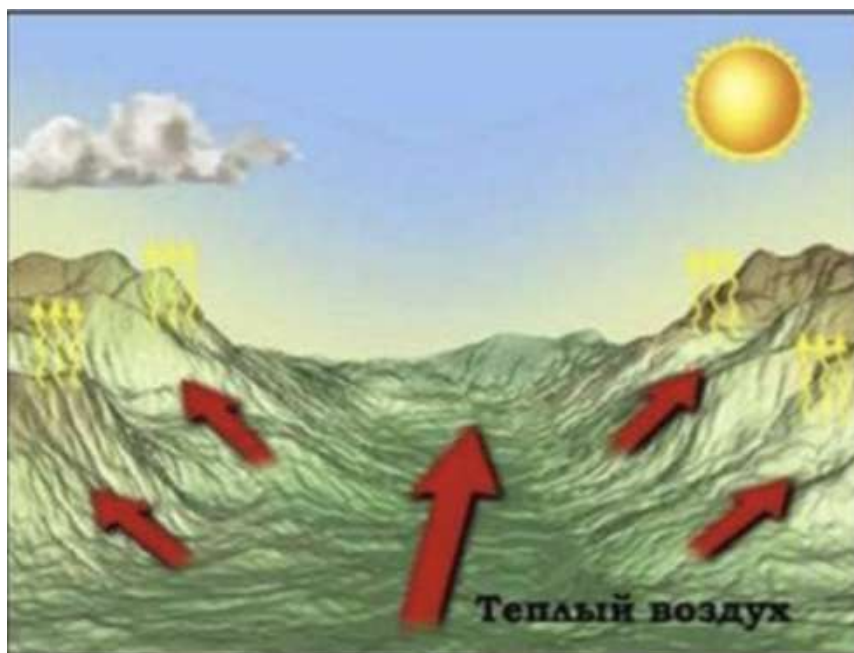


Рисунок 1.1.2.2. Перемещение ветра днем



Рисунок 1.1.2.3. Перемещение ветра ночью

«Скорость горного-долинного ветра незначительна, но в некоторых случаях может достигать 10 м/с. В умеренных широтах горные-долинные ветры встречаются летом, когда они не пересекаются с более мощными потоками глобальной циркуляции атмосферы. В тропических широтах они могут наблюдаться круглый год. Иногда фиксируется только дневной (долинный) или только ночной (горный) ветер; иногда горные-долинные ветры сочетаются с озерными бризами.»

«В высоких горах слой атмосферы, охваченный горным или долинным ветром, простирается от дна долин на 1 км и более, нередко - до гребней хребтов; выше обнаруживается ветер обратного направления (противотечение). В более низких горах горно-долинные ветры ограничиваются слоями над самыми склонами гор (склоновые ветры)»[5].

#### 1.1.4 Стоковый ветер

Стоковый ветер — это тип ветра, который движется вниз по склону горы или возвышенности под действием силы тяжести. Данный вид ветра является частью большей категории ветров, называемой кatabатическими ветрами(1.1.1.), которая включает в себя все ветры, основным движущим фактором которых является тяжесть охлажденного воздуха, который течет вниз по склонам.

Возникновение стоковых ветров прямо связано с процессами охлаждения воздуха. В ночное время или зимой воздух, находящийся над склонами гор, охлаждается быстрее, чем воздух в долинах или на равнинах. Охлажденный воздух становится более плотным и тяжёлым, и под действием силы тяжести он начинает стекать вниз, формируя стоковый ветер.

Наибольшей силы стоковые ветра достигают в Антарктиде(рисунок 1.1.4.1), где воздух стекает с высокого ледникового купола материка к побережьям, достигая вблизи них больших скоростей, однако далее 8—10 км в море стоковые ветра не распространяются.

Сила этих ветров в значительной степени зависит от рельефа местности, и их интенсивность и характер сильно меняются в зависимости от сезона. Летом стоковые ветра ослабевают, и их частота уменьшается, осенью начинается ночное охлаждение, которое усиливается по мере удлинения ночи, и ветра приобретают резко выраженный суточный ритм с максимальной скоростью после полудня. Зимой, во время полярной ночи, ветры дуют непрерывно, и суточного ритма не наблюдается. Стоковые ветра являются одним из основных факторов, формирующих климат

ледников и соседствующих с ними регионов, в частности Антарктики, Гренландии и Арктических островов. Стоковый ветер с материка Антарктиды влияет на существование прибрежной полыньи и вызывает охлаждение прибрежных антарктических вод.

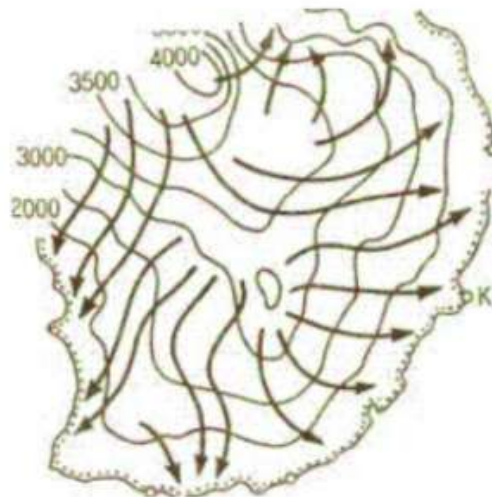


Рисунок 1.1.4.1. ветры в Восточной Антарктиде

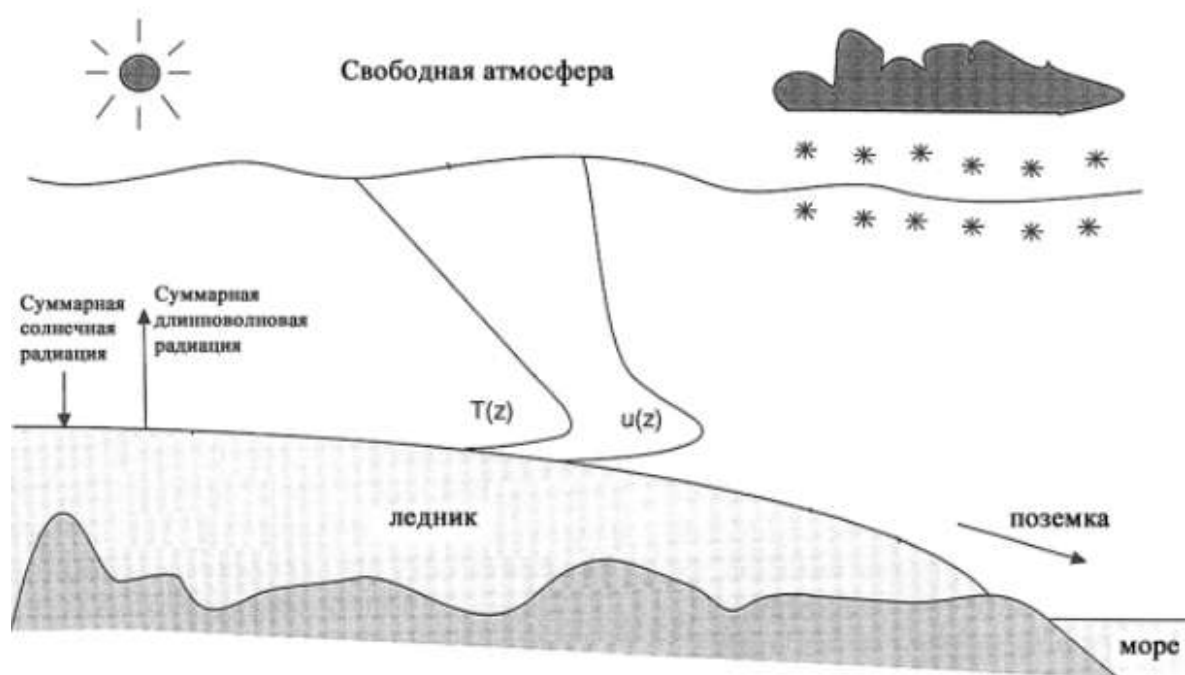


Рисунок 1.1.4.2. Строение ветра [1]

Направление стокового ветра у побережий чаще всего юго-восточное, что обусловлено сочетанием меридиональной составляющей стокового ветра с восточным переносом воздуха вокруг материка в процессе общей циркуляции атмосферы.

#### 1.1.5 Фён

Фён - является относительно теплым и сухим ветром, дующий сильно и порывисто с гор(Рис. 6).

Высота дающая возможность достижения антициклонической инверсии является определяющим фактором в появлении фена. Для умеренных широт характерные свойства наблюдаются при относительной высоте не менее около 1000 метров [3].

Для образования фенового ветра необходимо присутствие антициклонической системы с одной стороны и низкой с противоположной.

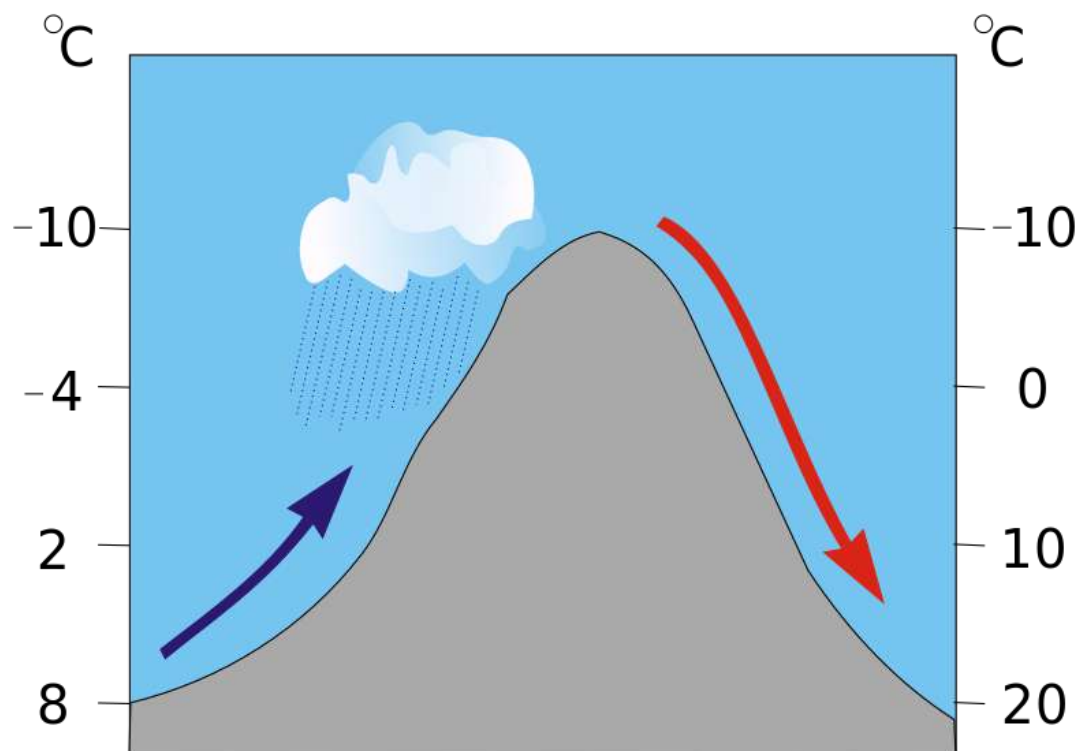


Рисунок 1.1.5.1. Механизм образования Фёна. Синяя стрелка(слева) - холодный воздух, красная стрелка(справа) - тёплый воздух[4]

Когда поток воздуха спускается по наклону подветренной стороны, он адиабатически разогревается. Это приводит к тому, что водяной пар в воздухе удаляется от точки насыщения. В результате воздух попадает в долину с более высокой температурой и более низкой относительной влажностью, чем ранее преобладавший там воздух. Чем выше начальная высота, с которой опускается воздух, тем выше температура фёна. Изменения температуры и влажности воздуха во время фёна могут происходить очень быстро и резко: за 1-2 часа температура может повыситься на 30-40°C, а влажность может упасть до 10\% и ниже. Продолжительность фёна может варьироваться от нескольких часов до 5 дней и более. Скорость ветра во время фёна может колебаться от небольших значений до 15-20 м/с, а иногда может достигать 30-40 м/с.

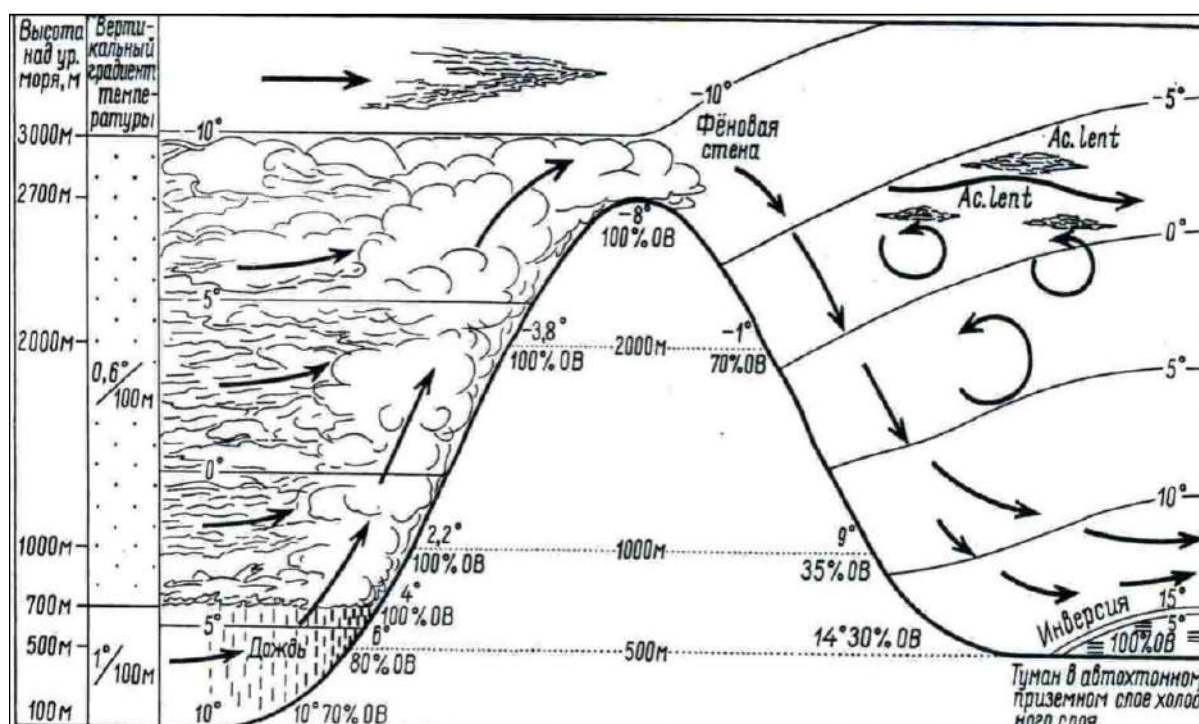


Рисунок 1.1.5.2. Схема южного фёна в Альпах

Обычно фёны наблюдаются на Западном Кавказе, на Южном берегу Крыма, в горах Средней Азии и Алтая, Альпах(рисунок 1.1.5.2) в Якутии, западной Гренландии, на восточных склонах Скалистых гор.

## 2. БОРА

Бора представляет собой мощный, холодный и часто шквалистый ветер, преимущественно дующий в холодный сезон года. Этот ветер

характеризуется перетеканием холодного воздушного фронта через горный массив в направлении теплого моря (водоема)(рисунок. 2.1.)[6]

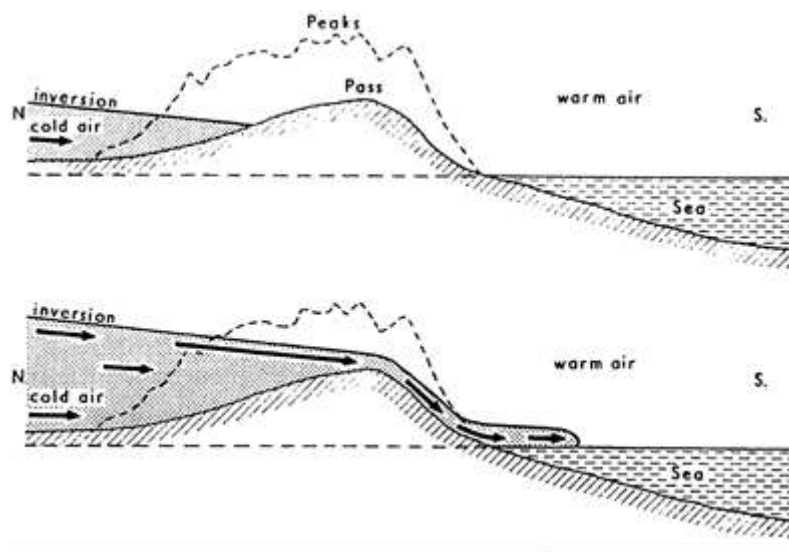


Рисунок 2.1. Схема образования боры

Аналогично фёну(1.1.5.), при боре наблюдается перемещение воздушных масс через горный хребет. но в этом случае перемещается очень холодный воздух, высота хребта небольшая, и адиабатическое нагревание воздуха при этом незначительно. Бора возникает при вторжении масс холодного воздуха, который, переваливая через невысокий хребет, с большой скоростью "стекает" по подветренному склону под действием градиента давления и силы тяжести.

Когда говорим о нагреве воздуха при боре, следует учесть, что он относительно слабый из-за небольшой высоты гор. Когда воздух поднимается на высоту до 1000 метров, он расширяется, но недостаточно сильно, чтобы значительно охладиться. Кроме того, воздух, спускающийся с гор, не подвергается значительному сжатию из-за небольшой высоты гор. В результате адиабатический нагрев воздуха при боре остается относительно слабым. Вертикальный масштаб боры достигает 200-400 м, а горизонтальный - всего несколько километров от берега.

Попробуем подробнее исследовать образование боры. Когда быстро движущийся вверх по течению холодный воздух находится глубже высоты хребта, то с подветренной стороны могут спускаться довольно быстрые, порой достигающий ураганной силы, холодные ветры. Ветры ускорятся в сужении между горой и вышележащей инверсией, а давление падает в соответствии с эффектом Вентури. Относительно более низкое давление нарушает гидростатический баланс и тянет слой холодного воздуха вниз, при этом заставляя быстрые ветры обтекать склон. Вышележащий более теплый воздух также стягивается вниз из-за того же перепада давления.

Когда ветры достигают низины, они по-прежнему разрушительны и намного быстрее ветров, дующих вверх по склону горы, но медленнее, чем ветры на вершине хребта.

Бора проявляет силу вследствие увеличения скорости, преодолев стоящую на пути горную стену, начинает двигаться волнообразно под действием силы тяжести. Волнение возникает из-за встречи потока с барьерами(препятствиями). Также на скорость потока действует его сжатие на горном перевале(рисунок 2.2.).



Рисунок 2.2. Движение боры

Этот местный ветер, ограниченный географическими пределами, воздействует на небольшие зоны, где горы непосредственно соседствуют с морем. Во время этого явления скорость ветра может достигать 60 м/с, а порывы могут быть до 100 м/с. Этот ветер способен достигать штормовых или ураганных значений согласно шкале Бофорта и может вызывать множество повреждений.

Синоптическим условием для образования боры будет являться несколько значимых факторов, таких как:

- Возникновение области повышенного давления в антициклоне и область низкого давления над водоемом. Чем больше будет разница в давлении между сушей и морем, тем выше скорость будет при ветра при боре(рисунок. 2.2).
- В случае когда ветровой поток сталкивается с горным хребтом, его дальнейшее движение будет зависеть от высоты и скорости потока. В случае если хребет не слишком высок для потока (граница, как правило, составляет 1 км) и скорость достаточно высокая (от 8-10 м/с), то поток поднимается вверх по горному склону и, перевалив через хребет, “падает” вниз в сторону моря.

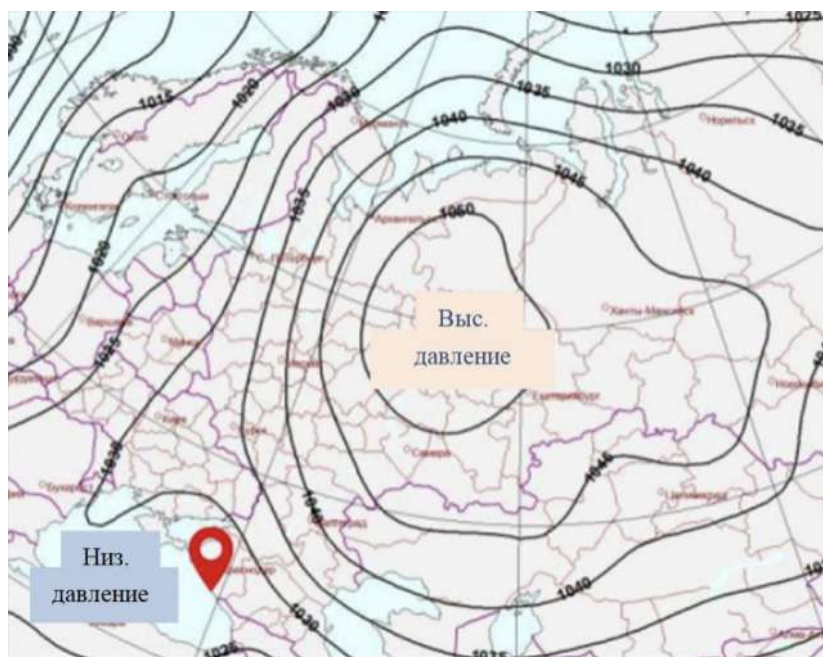


Рисунок 2.3. син. ситуация в районе города Новороссийск

Данный ветер имеет уникальные названия, в зависимости от региона его возникновения. Так например во Франция он называется - Мистраль, в Японии - Монсун-бора, в России на озере Байкал - Сарма, в Китае - Пяньфэй.

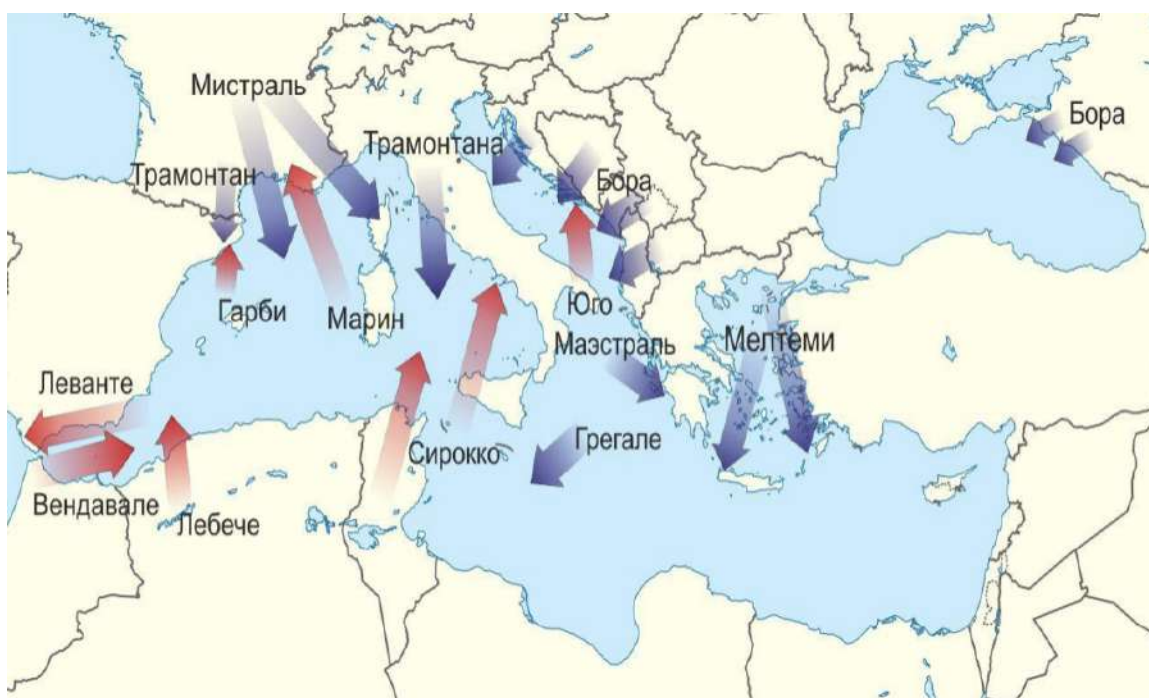


Рисунок 2.4. Карта с названиями ветров [8]

## 2.1. Бора в Новороссийске

Бора в Новороссийске - является холодным и сильным ветром северо-восточного направления, появляющийся из разницы температур, средняя высота которого 700 м над уровнем моря (рисунок 2.1.1). Происходит в виде обрушения холодной массы через Маркотхский перевал. Период жизни боры составляет от 1 до 7 дней. При боре может достигаться ураганная скорость - 40-50 м/с, с порывами до 79-99 м/с.



Рисунок 2.1.1. Схема воздушных потоков при Новороссийском боре  
Классификация боры

1. Стоковая бора – перетекание тонкого воздушного слоя на подветренной стороне гор из-за гравитации. Время холодное, высокое давление над сушей и низкое над морем. В Новороссийске максимум ветра 20 м/с. Продолжительность несколько часов. Не катастрофична.

2. Фронтальная бора – прохождение холодного фронта через Новороссийск. Высокие градиенты температуры и давления, инверсия на 0,7-1,5 км. Распространение до Туапсе. Продолжительность несколько дней до недели.

3. Внутримассовая бора – холодный поток, немного превышающий высоту хребта Варада. Нет резкого усиления ветра. Медленное изменение температуры и давления. Ветра до 25 м/с. Продолжительность 2-5 дней. Не катастрофична.

4. Муссонная бора – перемещение холодного воздуха из-за муссонной циркуляции. Двухслойное движение, инверсия. Переходные сезоны или зима. Ветра до 40 м/с, температура до  $-20^{\circ}\text{C}$ . Продолжительность 3-11 дней, самая катастрофическая.

5. Смешанная бора – комбинация с элементами стоковой боры у одного из основных видов (муссонная, фронтальная или внутримассовая).

## 2.2. Новоземельская бора

Новоземельская бора - это региональный восточный или западный, чрезвычайно мощный и неустойчивый ветер, который образуется при перемещении воздуха через широкий, но невысокий Новоземельский хребет (высоты 600-800 м), а фактически это - обрушение к морю холодного воздуха с гор архипелага Новая Земля.

В основном бура дует с востока - со стороны Карского моря, но иногда может дуть и с запада, со стороны Баренцева моря. Некоторые ученые относят ее к типу подветренных штормов, которые характеризуются крайне резким усилением ветра, понижением температуры воздуха и давления на подветренной стороне. Кроме того, Новую Землю можно назвать одним из самых ветреных мест в России, где ветер очень часто достигает ураганных показателей[7].

Однако Новоземельская бора не причиняет серьезного ущерба человеку и наземной инфраструктуре, так как архипелаг практически не населен.

Опираясь на исследования, можно сказать что новоземельская бора может дуют несколько дней, но наблюдались события продолжительностью до 7-9 дней, скорость ветра обычно может быть 20-30 м/с, но не превышает и 40 м/с при порывах. Резкое изменение скорости потока боры обусловлена образованием на подветренной стороне гор вихрей с горизонтальной осью и последовательным пульсационным обвалом объемов холодного воздуха, переваривающего высокогорье. Существует мнение о том, что сильная новоземельская бора может распространяется вглубь по поверхности водоема на 50-60 км и рождается при прохождении атмосферных фронтов, которые генерируют потоки воздуха, которые перемещаются перпендикулярно горному хребту. Главным фактором возникновения боры будет является устойчивая стратификация в нижнем слое атмосферы над Карским морем при наличии ветров восточного и юго-восточного направления. Кроме того, блокировка воздушного потока на наветренном восточном склоне гор способствует развитию сильного ветра на западном склоне и в прибрежной зоне Баренцева моря.

Западная и восточная бора регистрируется в холодное время года, в связи с тем что зимой циклоны более глубокие, а перепады давления большие, соответственно потоки, которые перетекают через хребет,

приобретают большую скорость, но отдельные случаи боры возможны поздней весной и даже летом[7].

Наиболее подходящей синоптической ситуацией для рождения боры будет перемещение североатлантического циклона по северной части европейской территории России; заметим что к северу от Новой Земли часто формируется антициклон. Появляется большой барический градиент, направленный вдоль новоземельского хребта, и сильный геострофический ветер восточного направления.

### 2.3. Байкальская бора

Одной из особенностей Байкала является наличие своих, специфических ветров(рисунок 2.3.5), которые не только формируют погоду в регионе, но и имеют собственные имена, характер и предвестники:

- **Верховик**, также известный как **Ангара**, дует с севера из долины реки Верхняя Ангара. Этот продольный ветер характерен тем, что дует равномерно и без порывов, создавая огромные волны высотой до четырех метров. Погода при этом, как правило, сухая и ясная. Верховик обычно начинается утром, после восхода солнца, и может стихать перед закатом, хотя может дуть и до десяти дней подряд. Это один из самых известных байкальских ветров. Предвестником верховика служит ярко-красный горизонт перед восходом солнца.
- **Култук**, или **Низовик**, дует с южной оконечности Байкала. Это продольный ветер, который дует в направлении, противоположном верховику, и может охватывать всю котловину Байкала. По продолжительности он уступает верховику. Култук несет с собой мощные штормы, дожди и пасмурную погоду. Предвестником култука служат темные тучи, собирающиеся в горах Хамар-Дабана.[19]

- Шелоник - юго-восточный ветер, дующий из Монголии через хребты Хамар-Дабана с силой 7-10 м/с. Шелоник чаще всего наблюдается весной, осенью и в начале зимы и охватывает только южную часть озера Байкал. Этот ветер приносит теплую и солнечную погоду.[19]
- Горная - это северо-западный ветер, относящийся к поперечным ветрам. Холодный воздушный поток срывается с гор, отсюда и его название, со склонов Приморского и Байкальского хребтов и распространяет свое влияние только на западное побережье Байкала. Возникновение этого ветра обусловлено существованием на северном побережье Байкала горных гряд Приморского и Байкальского хребтов. Холодные массы, подходя к Байкалу, скапливаются у этих горных массивов, не в силах перевалить их сходу. Накопив критическую массу, холодный воздух переваливает через горы и, ускоряясь, устремляется по крутым склонам к Байкалу. В некоторых местах побережья - в долинах горных рек - существуют особенно благоприятные условия для разгона воздушных потоков. Так возникают, харахаиха и другие разновидности горного ветра ураганной силы. Горная - является самым свирепым и коварным из байкальских ветров. Налетает внезапно, скорость нарастает скачками, при этом достигая ураганных скоростей(риунок 2.3.1.) - около 40-50 м/с.[19]
- Бугульдейка - это разновидность ветра горная, который образуется на Лено-Ангарском плато, преодолевает Приморский хребет и дует по долине реки Бугульдейка. Это мощный, порывистый ветер, скорость которого может достигать 20 м/с.[19]
- Селенга - это холодный, поперечный ветер, дующий из долины реки Селенга на озере Байкал. Этот ветер юго-восточного направления иногда может достигать западного берега и приводить к возникновению мертвой зыби в районе устья реки Бугульдейка. Скорость ветра до 10 м/с.[19]

Из выше перечисленных местных ветров Байкала, сарма, горная и баргузин являются бороподобными ветрами.

| Баллы<br>Бофорта | Сила и средняя скорость ветра |             |       | Определение силы<br>ветра |
|------------------|-------------------------------|-------------|-------|---------------------------|
|                  | м/с                           | км/ч        | узлы  |                           |
| 0                | 0-0,2                         | 0,0—0,7     | 0—1   | Штиль                     |
| 1                | 0,3-1,5                       | 1,1—5,4     | 1—3   | Тихий ветер               |
| 2                | 1,6—3,3                       | 5,8—11,9    | 4—6   | Легкий ветер              |
| 3                | 3,4—5,4                       | 12,2—19,4   | 7—10  | Слабый ветер              |
| 4                | 5,5—7,9                       | 19,8—28,4   | 11—16 | Умеренный ветер           |
| 5                | 8,0—10,7                      | 28,8—38,5   | 17—21 | Свежий ветер              |
| 6                | 10,8—13,8                     | 38,9—49,7   | 22—27 | Сильный ветер             |
| 7                | 13,9—17,1                     | 50,1—61,6   | 28—33 | Крепкий ветер             |
| 8                | 17,2—20,7                     | 61,9—74,5   | 34—40 | Очень крепкий ветер       |
| 9                | 20,8—24,4                     | 74,9—87,8   | 41—47 | Шторм                     |
| 10               | 24,5—28,4                     | 88,2—102,2  | 48—55 | Сильный шторм             |
| 11               | 28,5—32,6                     | 102,6—117,4 | 56—63 | Жестокий шторм            |
| 12               | >32,6                         | >117,4      | >63   | Ураган                    |

Рисунок 2.3.1. Шкала Бофорта

| <i>По<br/>форми-<br/>ванию</i> | <i>По<br/>направлению</i> | <i>Общее<br/>название<br/>ветров</i> | <i>Название<br/>ветра</i> | <i>Скорость</i> |                                 |
|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|---------------------------|-----------------|---------------------------------|
|                                |                           |                                      |                           | <i>м/сек</i>    | <i>По шкале<br/>Бюфорта</i>     |
| Муссонные                      | Продольные<br>(проходные) |                                      | верховик                  | 2 – 9           | от тихого до<br>свежего         |
|                                |                           |                                      | култук                    | 5 - 10          | от слабого до<br>свежего        |
| Фёновые                        | Поперечные                | горная                               | анга                      | 5 - 15          | От слабого до<br>крепкого       |
|                                |                           |                                      | ангара                    | 5 - 15          | От слабого до<br>крепкого       |
|                                |                           |                                      | бугульдейка               | 5 - 20          | От слабого до<br>очень крепкого |
|                                |                           |                                      | зундук                    | 5 - 15          | От слабого до<br>крепкого       |
|                                |                           |                                      | молокон                   | 5 - 15          | От слабого до<br>крепкого       |
|                                |                           |                                      | мужинай                   | 5 - 15          | От слабого до<br>крепкого       |

|  |  |  |           |        |                           |
|--|--|--|-----------|--------|---------------------------|
|  |  |  | рель      | 5 - 15 | От слабого до<br>крепкого |
|  |  |  | сарма     | 5 - 40 | От слабого до<br>урагана  |
|  |  |  | слюдянка  | 5 - 15 | От слабого до<br>крепкого |
|  |  |  | тыя       | 5 - 15 | От слабого до<br>крепкого |
|  |  |  | харахаиха | 5 - 40 | От слабого до<br>урагана  |

Рисунок 2.3.2. Классификация ветров Байкала. Часть 1[18].

|          |            |            |            |         |                       |
|----------|------------|------------|------------|---------|-----------------------|
| Бризовые | поперечные | полудённик | баргузин   | 10 - 35 | От свежего до урагана |
|          |            | шелонник   | абрамиха   | 1 - 10  | От тихого до свежего  |
|          |            |            | аносовка   | 1 - 10  | От тихого до свежего  |
|          |            |            | безымянная | 1 - 10  | От тихого до свежего  |
|          |            |            | выдриная   | 1 - 10  | От тихого до свежего  |
|          |            |            | мантуриха  | 1 - 10  | От тихого до свежего  |
|          |            |            | мишиха     | 1 - 10  | От тихого до свежего  |
|          |            |            | мысовая    | 1 - 10  | От тихого до свежего  |
|          |            |            | переёмная  | 1 - 10  | От тихого до свежего  |
|          |            |            | слюдянка   | 1 - 10  | От тихого до свежего  |
|          |            |            | снежная    | 1 - 10  | От тихого до свежего  |
|          |            |            | солзан     | 1 - 10  | От тихого до свежего  |
|          |            |            | утулик     | 1 - 10  | От тихого до свежего  |
|          |            |            | хара-мурин | 1 - 10  | От тихого до свежего  |

Рисунок 2.3.3. Классификация ветров Байкала. Часть 2[18].

|  |  |  |                   |        |                      |
|--|--|--|-------------------|--------|----------------------|
|  |  |  | бережник          | 1 - 10 | От тихого до свежего |
|  |  |  | большая           | 1 - 5  | От тихого до слабого |
|  |  |  | большая черемшана | 1 - 5  | От тихого до слабого |
|  |  |  | большой чивыркуй  | 1 - 5  | От тихого до слабого |
|  |  |  | кабанья           | 1 - 5  | От тихого до слабого |
|  |  |  | кика              | 1 - 5  | От тихого до слабого |
|  |  |  | максимиha         | 1 - 5  | От тихого до слабого |
|  |  |  | малая черемшана   | 1 - 5  | От тихого до слабого |
|  |  |  | селенга           | 1 - 5  | От тихого до слабого |
|  |  |  | сосновка          | 1 - 5  | От тихого до слабого |
|  |  |  | сухая             | 1 - 5  | От тихого до слабого |
|  |  |  | таркулик          | 1 - 5  | От тихого до слабого |
|  |  |  | турка             | 1 - 5  | От тихого до слабого |
|  |  |  | чивыркуй          | 1 - 5  | От тихого до слабого |
|  |  |  | шегнанда          | 1 - 5  | От тихого до слабого |
|  |  |  | ширильды          | 1 - 5  | От тихого до слабого |

Рисунок 2.3.4. Классификация ветров Байкала. Часть 3[18].

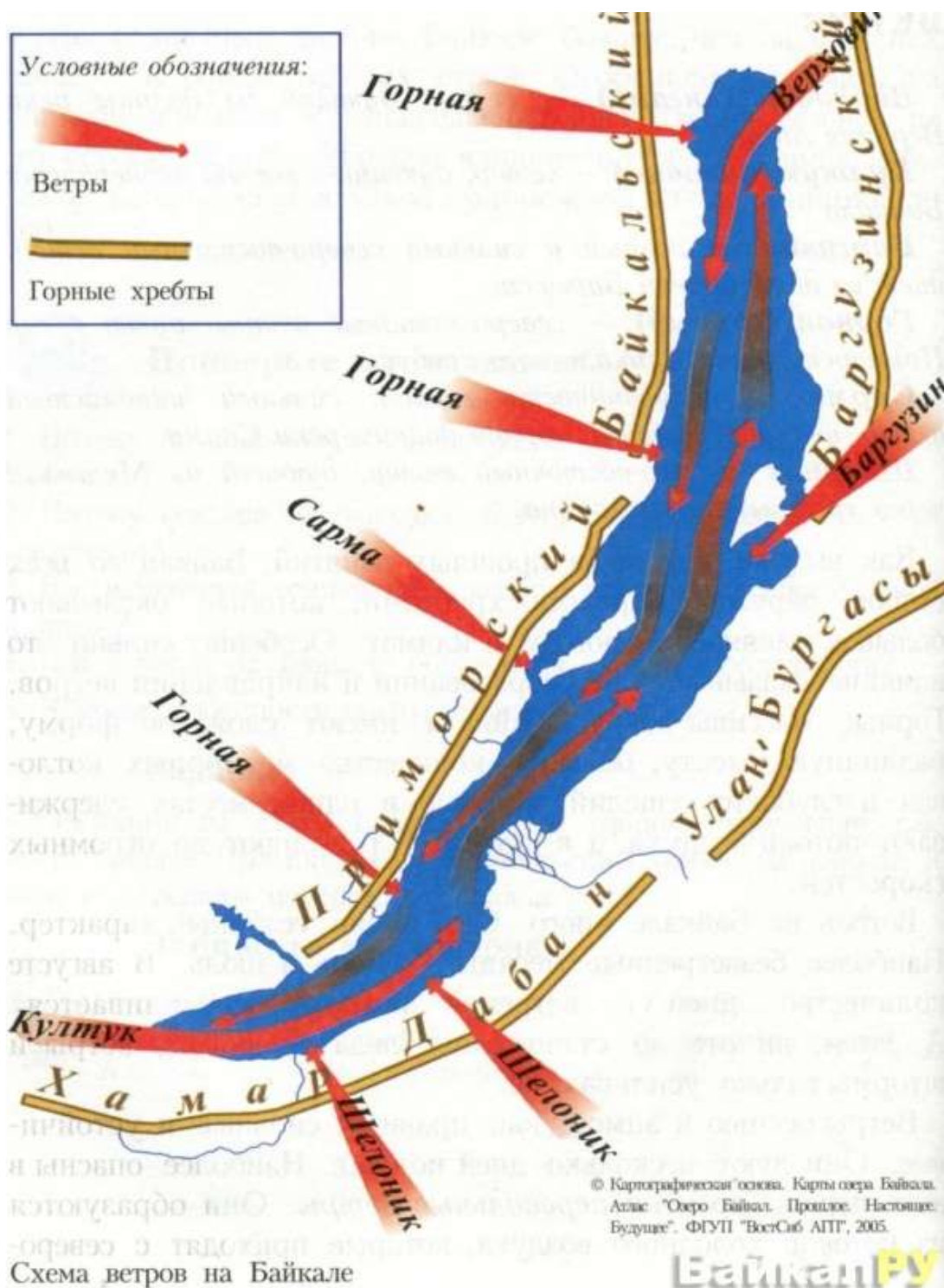


Рисунок 2.3.5. Карта ветров Байкала[17]

На рисунке 2.3.6 изображены примеры того, как байкальские местные ветры, особенно дующие поперёк озера, представлены на РЛИ. Четко заметно, что потоки холодного воздуха (горной) "врываються" на

водоем с запада/северо-запада и в зависимости от скорости ветра и общей метеорологической обстановки могут выглядеть как "языки" или "конусы выноса", а также как многочисленные поперечные полосы-струи, покрывающие всё озеро. Баргузин "вылетает" из долины реки в виде длинной локальной струи, которая в зависимости от общего переноса распространяется перпендикулярно озеру или уходит на север или на юг. Бывает что возникают случаи, где горная, которая дует с северо-запада, может встречается с баргузином близ центра озера[7].

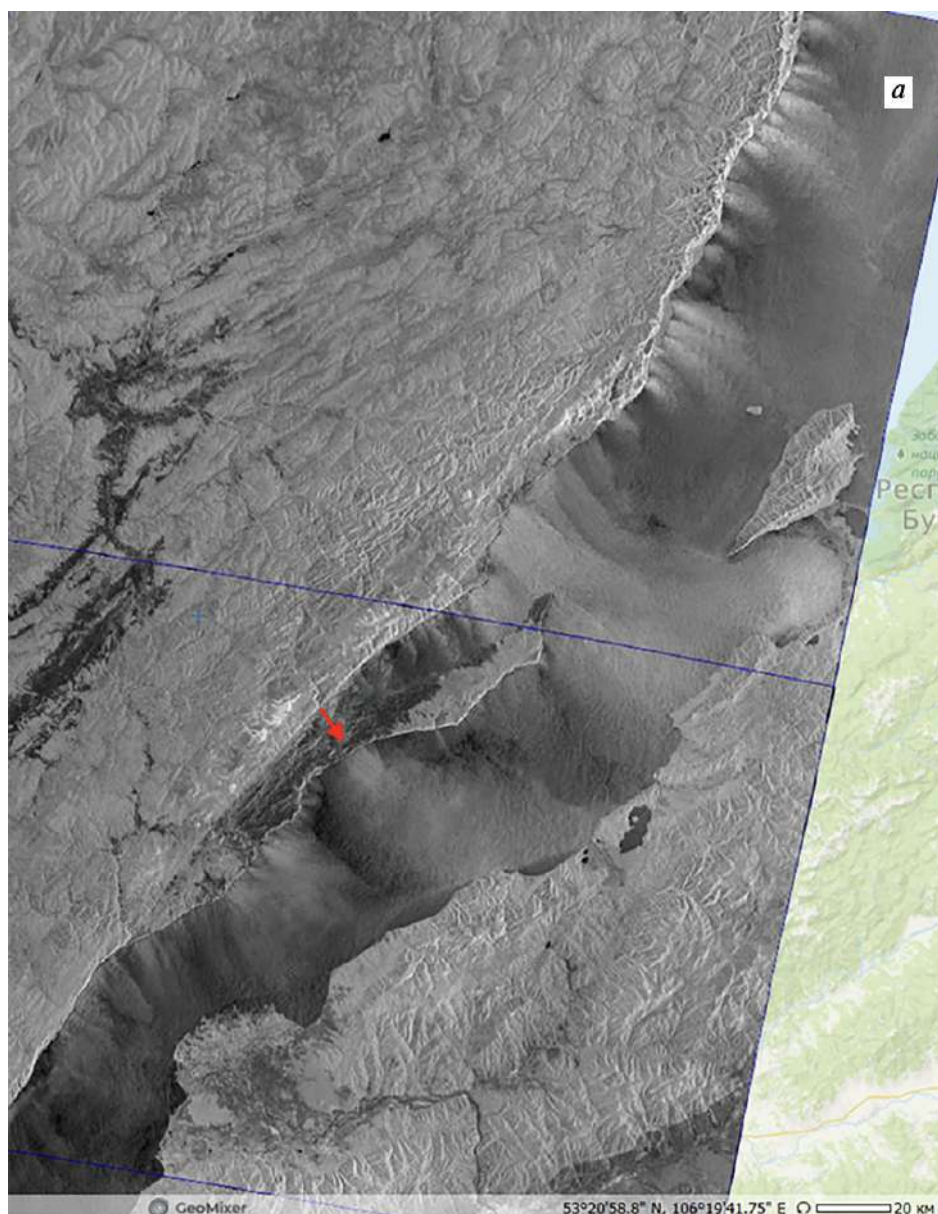


Рисунок 2.3.6. Горная и сарма, на РЛИ спутника Sentinel-1A от 3.10.2016 (23:06 UTC)[7]

### 2.3.1 Исторические случаи боры на Байкале

С борой на Байкале связано множество трагических историй. Вот самые известные из них[9-14]:

1. Об опасности Сармы еще в 17 веке упоминал известный путешественник, дипломат и купец Эверт Идес. В своих записках о путешествиях по Сибири он красочно описывал зимнюю переправу по байкальскому льду. Ураганный ветер был настолько силен, что «сносил весь снег». «Поверхность становилась такой скользкой, что лошади попросту не могли по ней передвигаться – постоянно падали. Неслучайно старожилы подковывали лошадей и быков специальными шипами, которые помогали им удержаться на льду.» По словам Идеса, «страшной трагедией может закончиться переправа на не подкованных лошадях рядом с не замерзшими полыньями, которых на Байкале встречается предостаточно. Лошади падают и порывами ветра их вместе с санями несет в ближайшую полынью. Удержать их невозможно, и чтобы не пропасть остается одно – бросить всё и смотреть, как под воду уходит лошадь, сани и вся поклажа.»
2. В 1872 году – попавший в Сарму пароход «Дмитрий» исчез бесследно[9]
3. В ноябре 1932 года налетевшая Сарма выбросила на камни пароход «Шмидт» вместе с баржей.
4. В ночь с 14 по 15 октября 1901 года произошел несчастный случай с участием парохода «Яков». Пароход вышел из Нижнеангарска, буксируя три парусника. На одном из них, «Потапове», перевозились бочки с омулем и икрой, 15 членов команды, 160 рабочих-промысловиков и несколько пассажиров, желающих добраться до Иркутска. Два других парусника были меньше и принадлежали местным купцам - шхуна Могилевой(рисунок 2.3.1.2.) и шхуна Шипунова. Когда «Яков» проходил Малое море, капитан заметил признаки надвигающейся непогоды. Белое облако начало увеличиваться и темнеть, над Байкалом закружились барашки. Последовало несколько сильных порывов ветра, и началась снежная буря. Ветер Сарма набирал силу, и весь караван начало сдувать к скалам. Пароход накренился на левый борт, и его правое колесо било воздух, а левое едва не сломалось под тяжелой темной водой. Капитан принял решение отцепить парусники, чтобы спасти пароход. «Потапов» исчез в водах Байкала (позже от него нашли лишь несколько обломанных досок)(рисунок 2.3.1.1.). Две другие шхуны обледенели, зацепившись за торчащие из воды скалы. В

течение двух дней, что бушевала Сарма, погибло 176 человек, в том числе 4 ребенка.

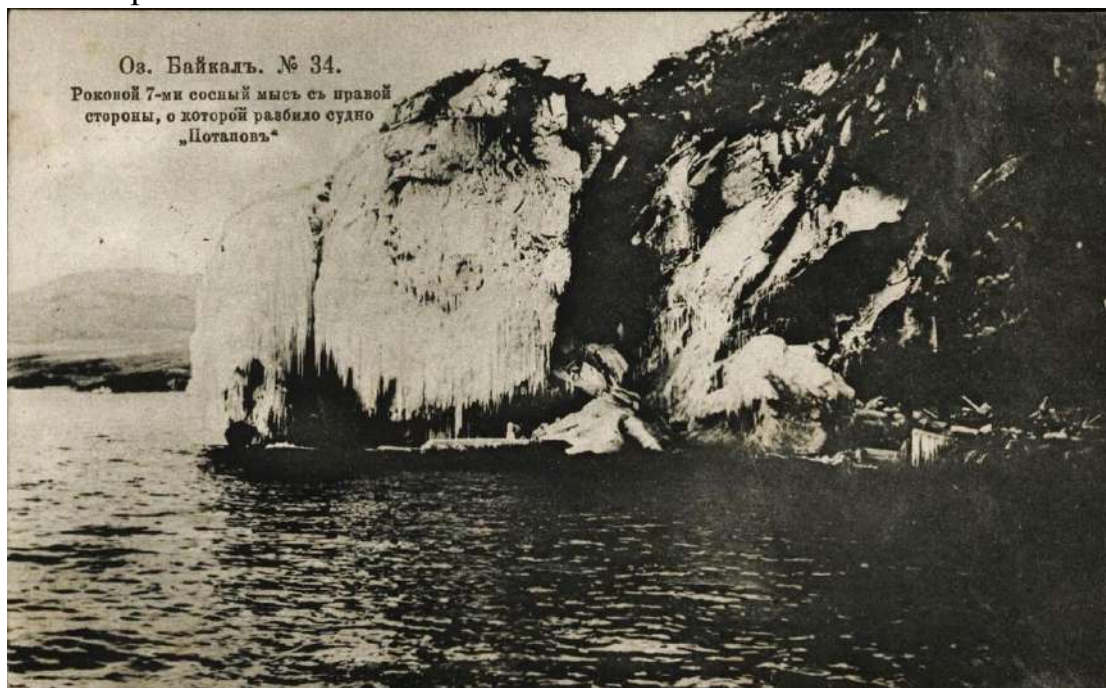


Рисунок 2.3.1.1. Роковой 7-ми сосный мыс с правой стороны, с которого разбилось судно «Потапов»[11]

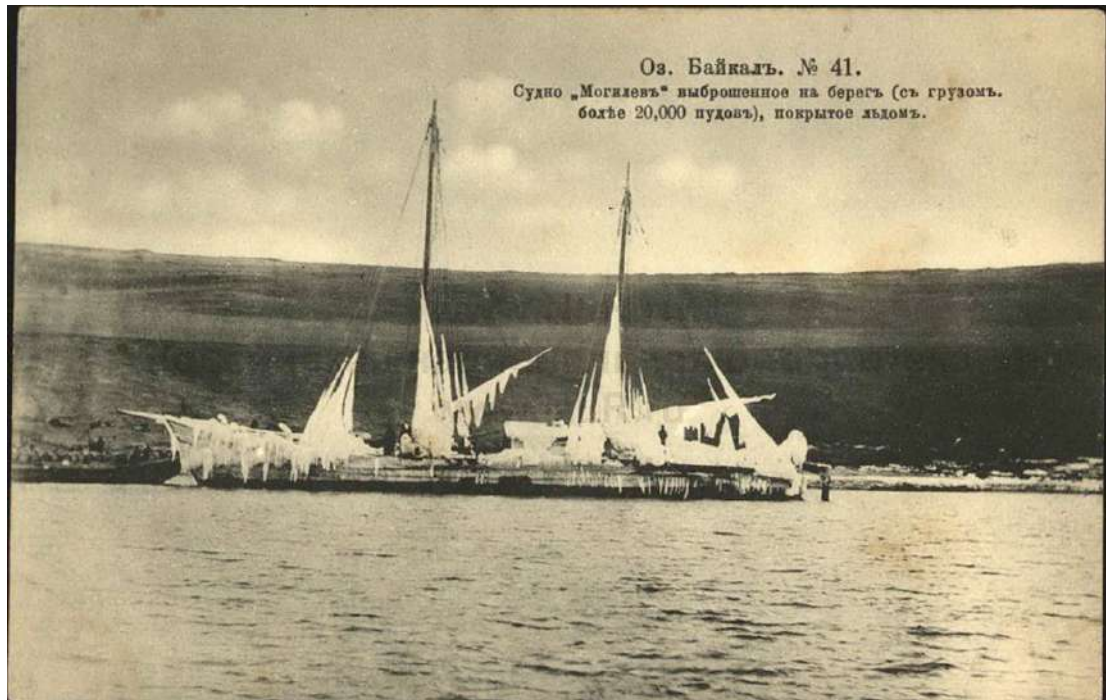


Рисунок 2.3.1.2. Судно Могилев, выброшенное на берег(с грузом, более 20000 пудов), покрытое льдом[13]

5. В конце сентября 1902 года пароход «Александр Невский»(рисунок 2.3.1.3) буксировал три баржи. Натиск Сармы был настолько силен и

стремителен, что у капитана не оставалось времени на раздумья. Он отдал приказ обрубить канаты. Шедшую последней баржу, выбросило на отмель, и ее пассажирам удалось спастись. Две другие – разбило о камни Кобыльей Головы. Лютый холод не дал пассажирам ни одного шанса – даже те, кому удалось выбраться из воды, умерли от переохлаждения. Пароход уцелел чудом – капитану удалось вывести судно на подветренный берег и закрепить на двух якорях, при этом колеса вращались на полном ходу всё время, пока бушевала стихия.



Рисунок 2.3.1.3. Пароход «Александр Невский» у причала[14]

6. В начале 50-х прошлого века близ Кобыльей Головы от Сармы погибло две сотни пассажиров большого катера. Это были молодые люди, приехавшие на лето в лагерь у Семинососенного. Местные поговаривали, что ветер был послан на отдыхающих в качестве наказания – они якобы пошли на экскурсию к горе, где потревожили гнездящихся там духов острова «святых орлов». Долго еще рыбаки вылавливали из Байкала человеческие кости, ведь по народным поверьям, Байкал «не хоронит утопленников в своих водах»

### 2.3.2 Формирование боры на Байкале

Байкальская бора — это сильный, порывистый и холодный местный ветер, дующий с гор на побережье озера Байкал. Возникает при вторжении холодного воздуха в долины и ущелья гор, окружающих Байкал, вследствие чего воздух резко спускается к озеру, создавая сильные порывы ветра, в действии скатывания тяжелой массы воздуха.

Бора наблюдается одновременно на двух берегах Байкала (рисунок 2.3.5). Ветра, дующие с западного берега, называются сармой и горной, а ветер, дующий с восточного берега, носит название баргузин.

В целом механизм формирования байкальской боры схож с механизмом формирования новороссийской боры.

## 3. ИССЛЕДОВАНИЕ БОРЫ НА ОЗЕРЕ БАЙКАЛ

Ряды конвективных облаков, часто называемые облачными "линиями" или "улицами", представляют собой пример упорядоченных пространственных структур в области облачности над морской поверхностью и поверхностью земли. Однако, наиболее совершенное геометрическое строение рядов, как и поля конвективных ячеек, встречается в основном над водной поверхностью. Они выявляются на спутниковых снимках, полученных преимущественно в видимом диапазоне, и обычно наблюдаются в нижней части атмосферы, в массах движущегося охлажденного воздуха над морской поверхностью при двумерной конвекции. Эти ряды образуются в относительно тонких слоях атмосферы с неустойчивой стратификацией, что указывает на неустойчивость нижнего слоя атмосферы.

Гряды облаков формируют кучевые облака, которые фактически образуют ячейки. Подобные ячейки обычно появляются, когда поверхность снизу теплее, чем окружающая атмосфера. Например, если потоки континентального холодного сухого воздуха перемещаются над соседней относительно теплой водной поверхностью, формируются облачные улицы. Когда холодный воздух отходит от суши или ледяной поверхности, его характеристики изменяются из-за вертикального обмена теплом и влажностью с подстилающей водной поверхностью. Возникает инверсионный слой, и высота его основания увеличивается с удалением от берега. Трансформация воздушной массы, наконец, приводит к образованию облаков, которые при определенных условиях могут принимать форму облачных улиц и развиваться почти параллельно направлению ветра.

На снимках в видимом диапазоне света бора, определяется по наличию облачных полос (улиц), которые появляются из-за изменения холодного воздушного потока при его движении над более теплой морской поверхностью. Также, при отсутствии облаков и взаимодействии ветра с неровностями прибрежного рельефа, на поверхности океана могут формироваться отличительные полосы-струи («замороженный ветер»), придавая явлениям бора полосатый вид.[15].

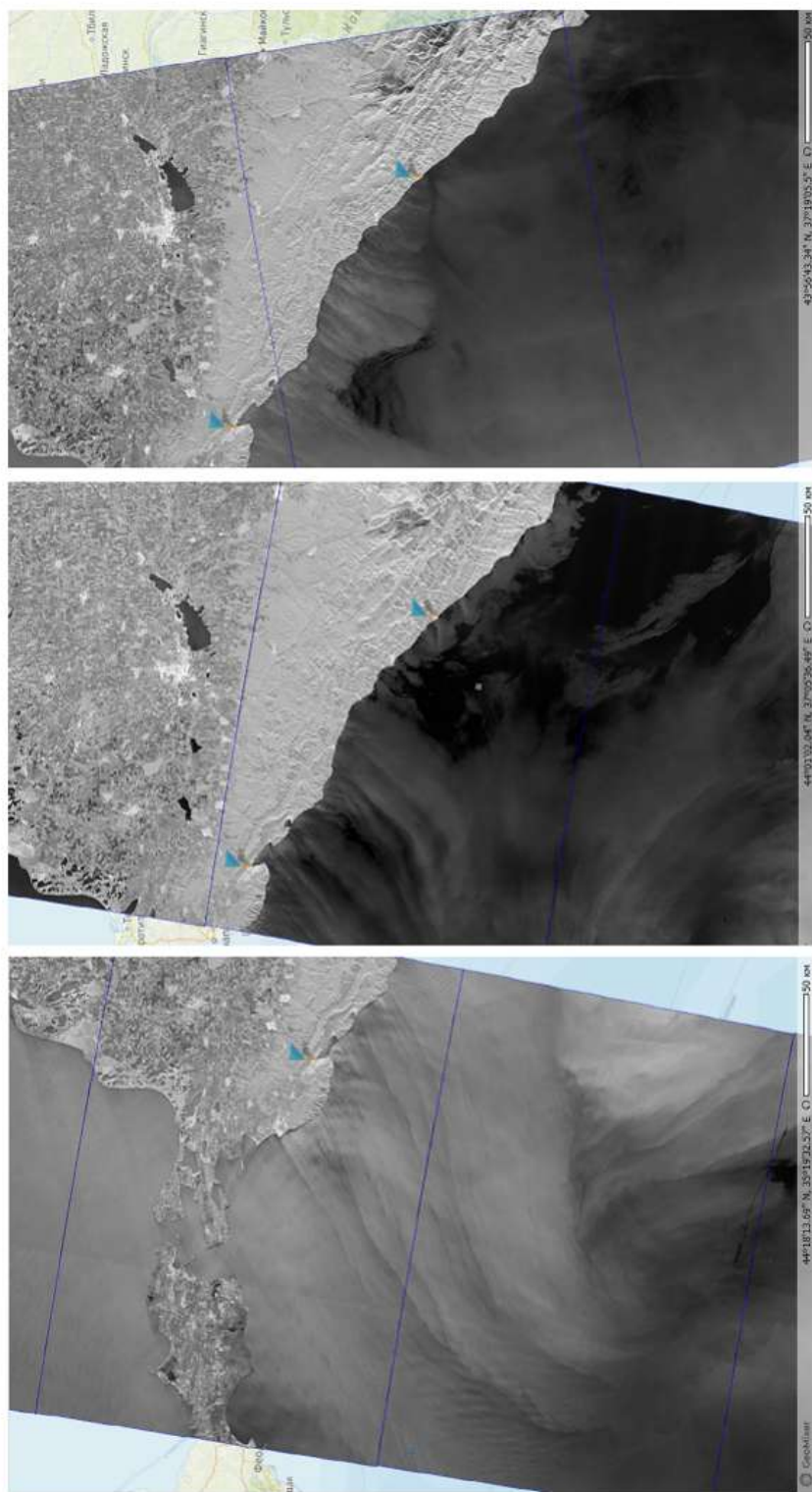


Рисунок 3.1. Новороссийской бора[6]

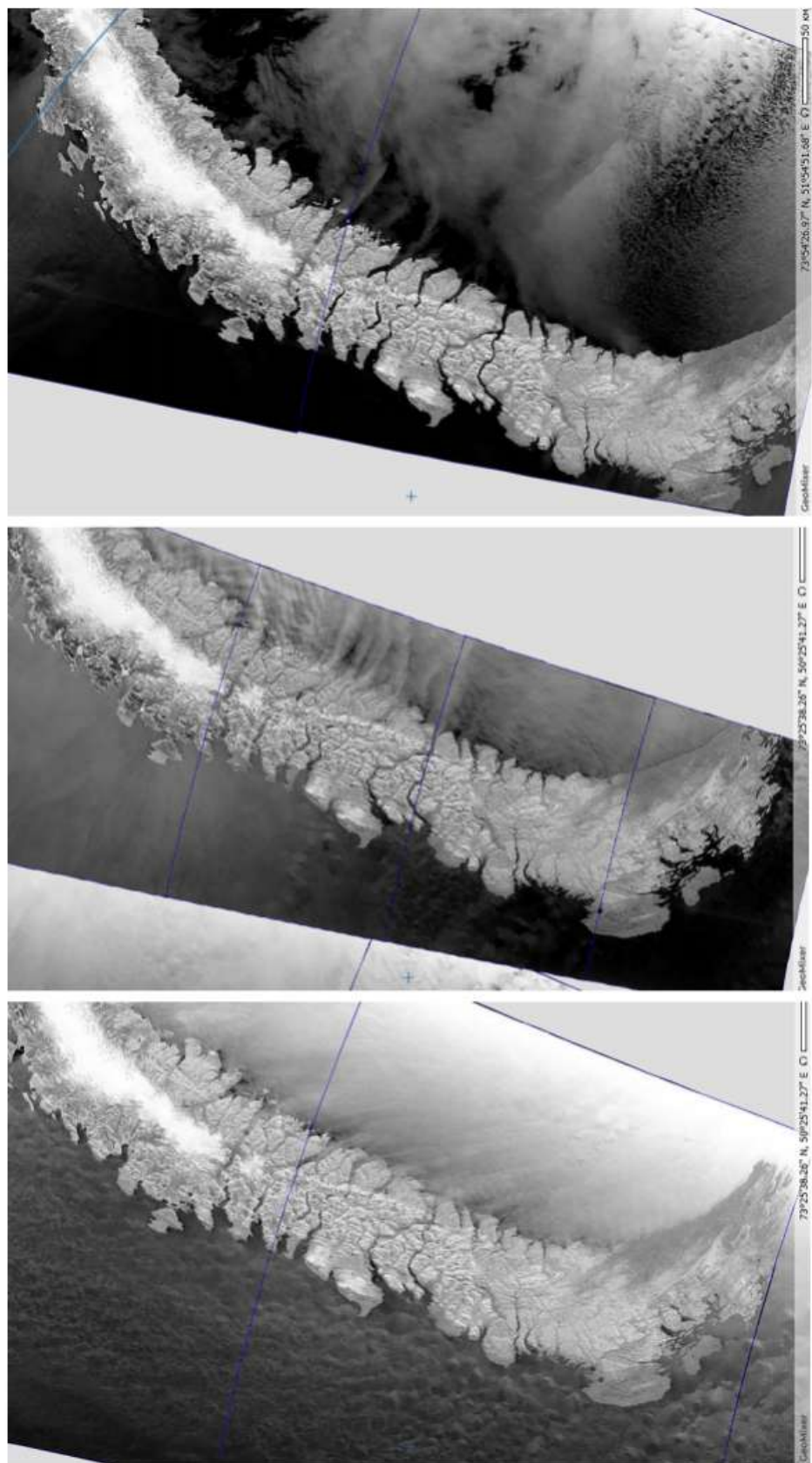


Рисунок 3.2. Западная новоземельская бора[7]

### 3.1. Анализ байкальской боры

Для исследования набегающего потока, определяющий состояние потока с подветренной стороны хребта, использовались снимки Sentinel-1, данные с аэрологической станции Ангарск(рисунок 3.1.1) и карта ветров с сайта Ventusky.

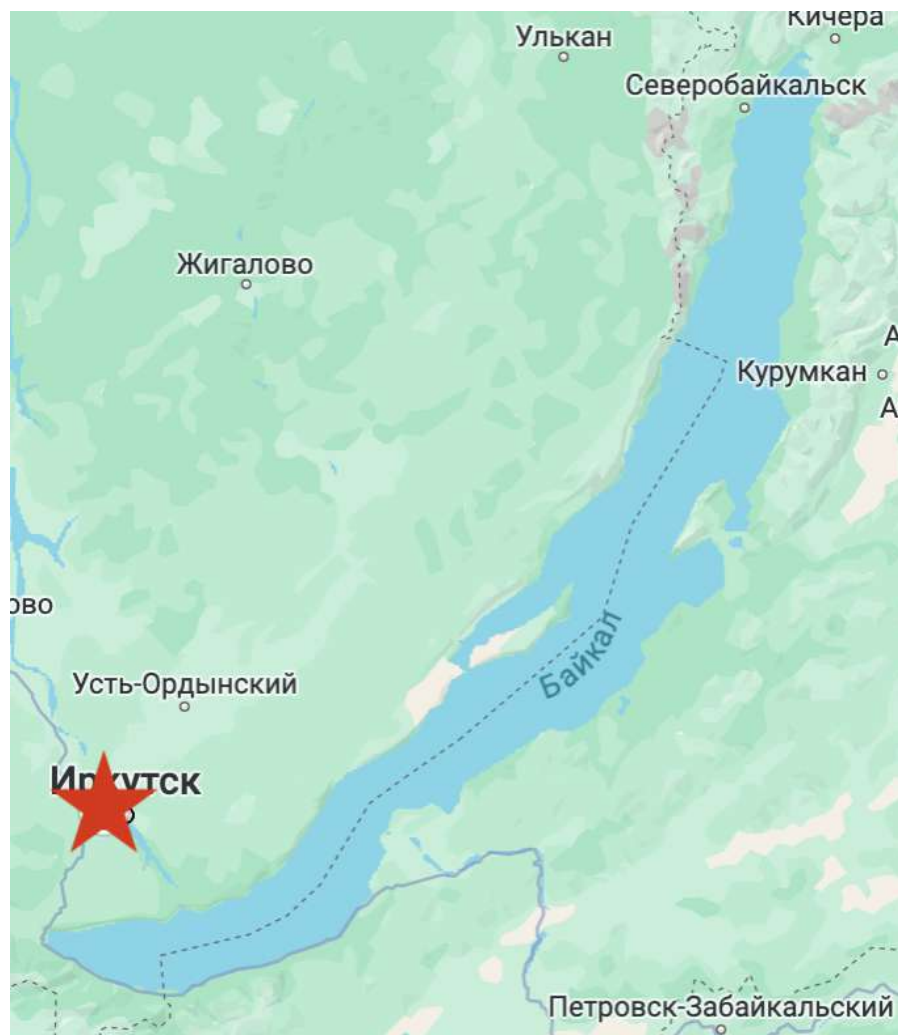


Рисунок 3.1.1 Местоположение станции Ангарск(выделено звездочкой)

В заданиях обтекания протяженных хребтов всегда есть частичное блокирование потока, который натекает на препятствие. Толщина слоя воздуха, то есть величина его блокирования, потенциальной энергии которого недостаточно чтобы сделать работу подъема частицы, увеличивается при низких скоростях ветра и большой устойчивости.

Близко к земле или в определённом слое, ограниченном высотой гребня, формируется зона стагнации потока, где ветер ослабляет свою силу или меняет направление. При небольшой длине гребня возможно боковое обтекание.

Лучше всего величину блокирования потока будет характеризовать при помощи обратного горного числа Фруда  $Fr^{-1}$ , а также числа Бюргера  $Bu$ . Обратное горное число Фруда и число Бюргера выражается по формулам показанных на рисунке 3.1.2 и 3.1.3 соответственно.[20]

$$Fr_m^{-1} = \frac{Nhm}{U}$$

где  $U$  – скорость натекающего потока,  $N$  – частота Брента-Вейселя,  
 $hm$  - высота препятствия

Рисунок 3.1.2 Формула обратного числа Фруда

Критерий числа Фруда для блокировки (предпочтение отдается блокировке, когда  $Fr^{-1} > 1$ ) оказывается достаточно хорошим предиктором блокировки.[20]

Число Бюргера учитывает влияние как крутизны рельефа (даже если рельеф имеет крутой уклон, возмущения давления могут быть не точно предсказаны с помощью, так и влияния вращения. Блокировка может произойти, когда  $Bu > 1$ , даже если  $Fr^{-1} < 1$ ; такие препятствия считаются гидродинамически крутыми. В таких ситуациях подъем, вызванный крутизной местности, приводит к возникновению сильного отрицательного градиента давления.[20]

$$Bu = \frac{N h m}{f L m}$$

$N$  - частота Брент-Вейселя,  $f$  - параметр Кориолиса,  $h m$  - высота препятствий,  $L m$  - полудлина препятствия вдоль потока

Рисунок 3.1.3 Формула числа Бюргера

#### Elevation profile

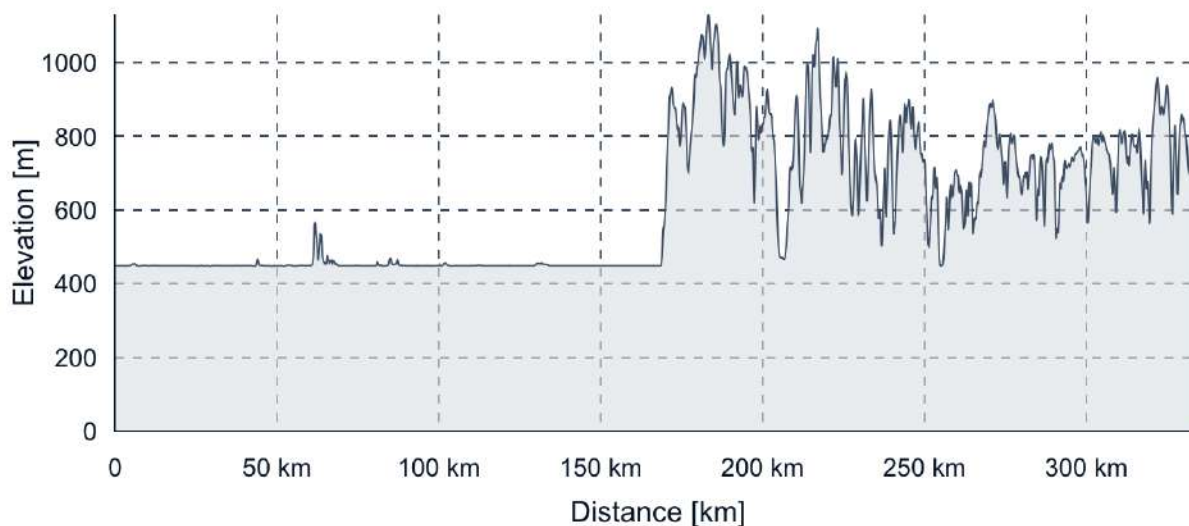


Рисунок 3.1.2 Профиль высот прибрежной полосы в области которой проводились расчеты

### 3.2. Формирование архива и расчет чисел Фруда и Бюргера

Исходя из ежедневной спутниковым снимка Sentinel-1 и данным аэрологической станции Ангарск, был создан архив изображений байкальской боры за период с 2014, 2017-2021 годы. Для автоматизации

рутинных задач по форматированию данных для расчетов был написал скрипт на языке программирования Ruby:

```
require 'csv'

class ParseCSV
  def self.get_values_by_header(csv_file, header)
    values = []
    CSV.foreach(csv_file, headers: true) do |row|
      values << row[header]
    end
    values
  end
end

class CreateCSVFile
  def self.run file_name, data
    data = data.split(/\n/)[0].split(/\n/)
    CSV.open("data/#{file_name}.csv", 'wb') do |csv|
      csv << %w[PRES HGHT TEMP DWPT RELH MIXR DRCT SKNT
      THTA THTE THTV]
      data.each do |row|
        csv << row.gsub(/(\w)\s+/, '\1,').split(',')
      end
    end
  end
end
```

Количество бороподных ветров на Байкале на западном его берегу составило 38 случаев.

Распределение по годам произошло следующим образом(рисунок 3.2.1): 2014 год - 11 случаев, 2017 год - 3 случая, 2018 год - 8 случаев, 2019 год - 5 случаев, 2020 год - 4 случая и в 2021 год - 7 случаев.

Также было подсчитано распределение случаев по месяцам(рисунок 3.2.2), наибольшее количество случаев байкальской боры было выявлено в ноябре - 7 случаев, наименьшее в марте - 0 случаев. Преимущественно бора наблюдалась в холодные периоды года(осень, зима) - 27 случаев

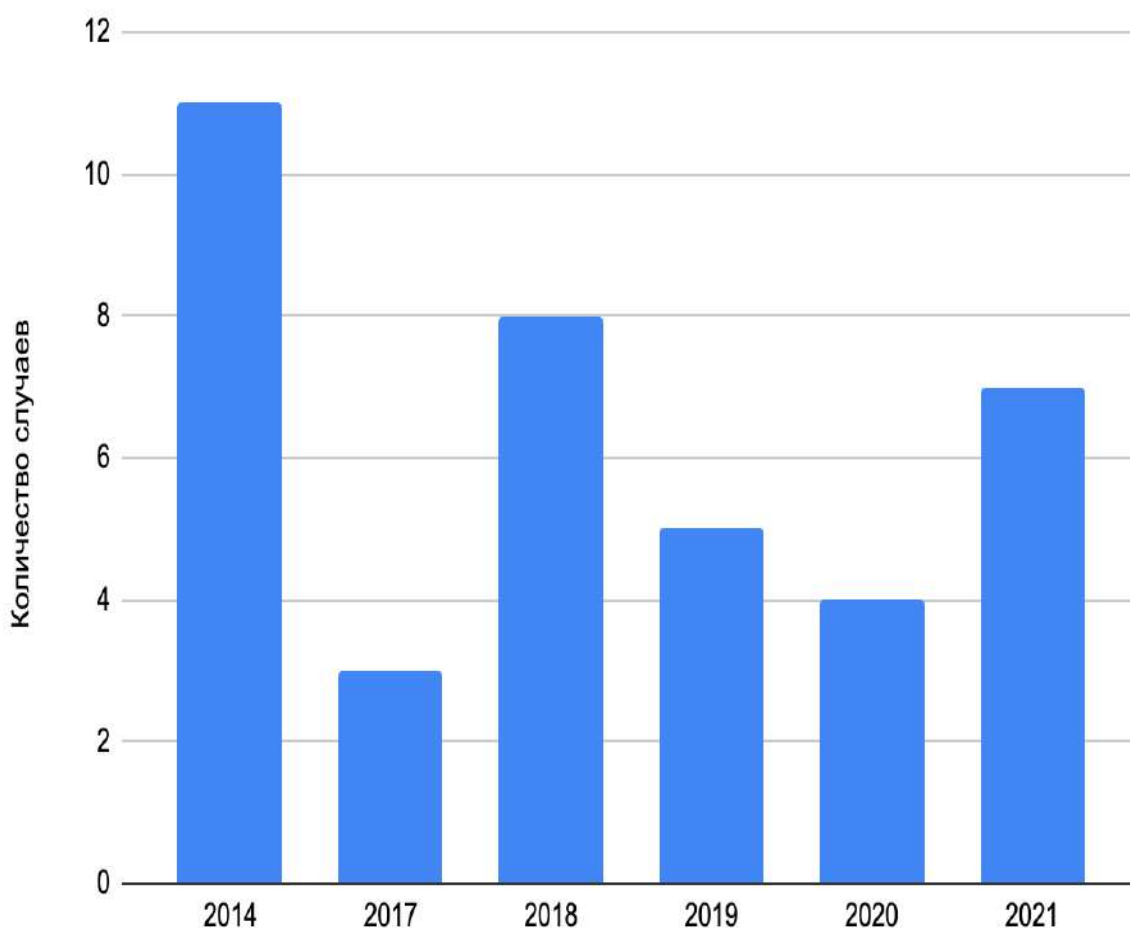


Рисунок 3.1.1. Количество случаев на Байкале на западном берегу, в период с 2014, 2017 по 2021 года.

### Распределение случаев по месяцам

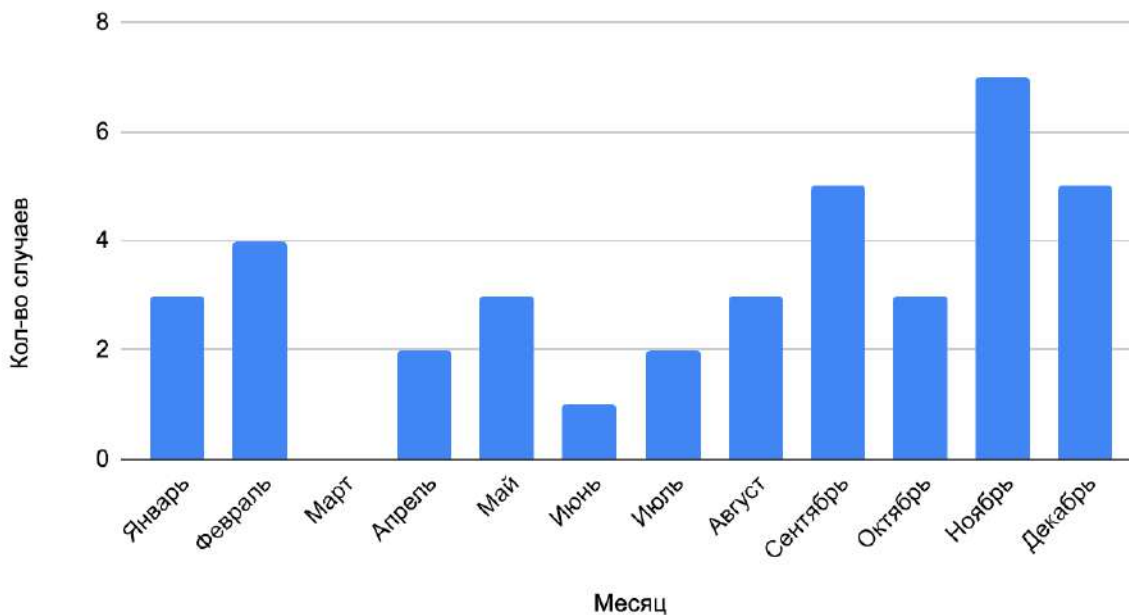


Рисунок 3.2.2 Распределение случаев по месяцам

В ходе работы были получены чисел Фруда и Бюргера.

Скрипт для расчета чисел Фруда и Бюргера написанный на Ruby:

```
module Constant
  G = 9.81
  HMW = 800 # высота для западного берега
  WLM = 2500 / 2 # ширина для западного берега
end
class BrentVaisala
  include Constant
  def initialize heights, potential_temps
    @heights = heights
    @potential_temps = potential_temps
  end
  def calculate
    (Constant::G * diff_potential_temps) / (average_potential_temps *
diff_heights)
  end
  private
  attr_reader :heights, :potential_temps
  def average_potential_temps
    potential_temps.sum.to_f / potential_temps.size
  end
end
```

```

def diff_potential_temps
  potential_temps.max - potential_temps.min
end
def diff_heights
  heights.max - heights.min
end
end
class Fruda
  include Constant
  def initialize brent_vaisala, speed_winds
    @brent_vaisala = brent_vaisala
    @speed_winds = speed_winds.map { _1 / 2 }
  end
  def west_calculate
    (brent_vaisala * Constant::HMW) / avg_speed_winds
  end
  private
  attr_reader :brent_vaisala, :speed_winds
  def avg_speed_winds
    speed_winds.sum / speed_winds.size
  end
end
class Burger
  include Constant
  def initialize brent_vaisala
    @brent_vaisala = brent_vaisala
  end
  def west_calculate
    (brent_vaisala * Constant::HMW) / (koriolis_params * Constant::WLM / 2)
  end
  private
  attr_reader :brent_vaisala
  def koriolis_params
    1.148 * 10**-4
  end
end
end

```

### Число Фруда

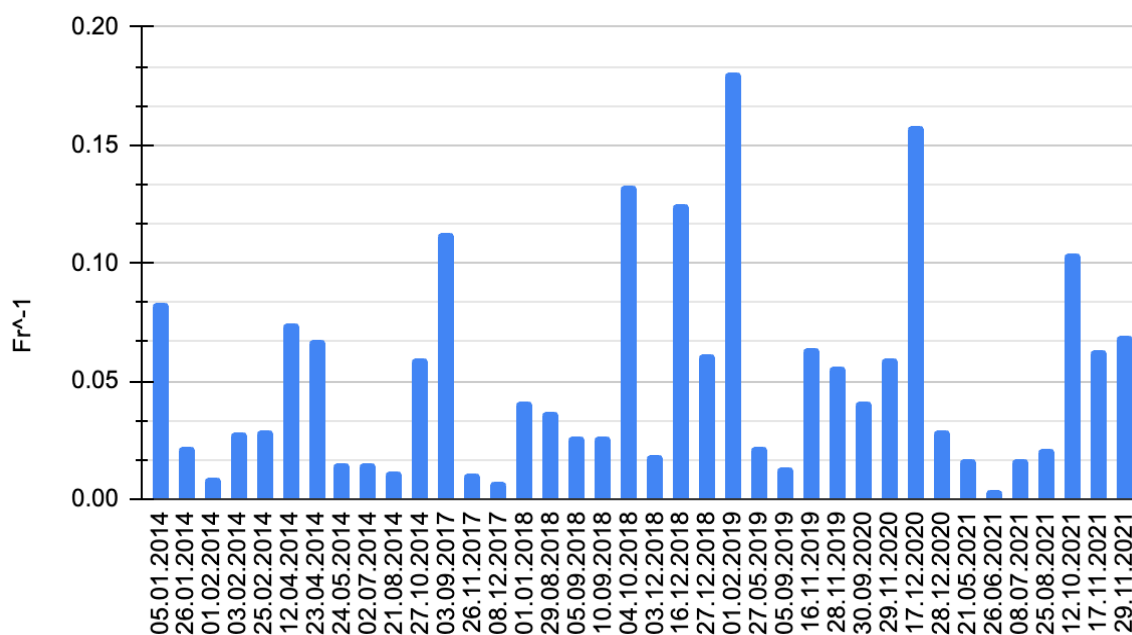


Рисунок 3.2.3 Значения обратных чисел Фруда для каждой даты

### Число Бюргера

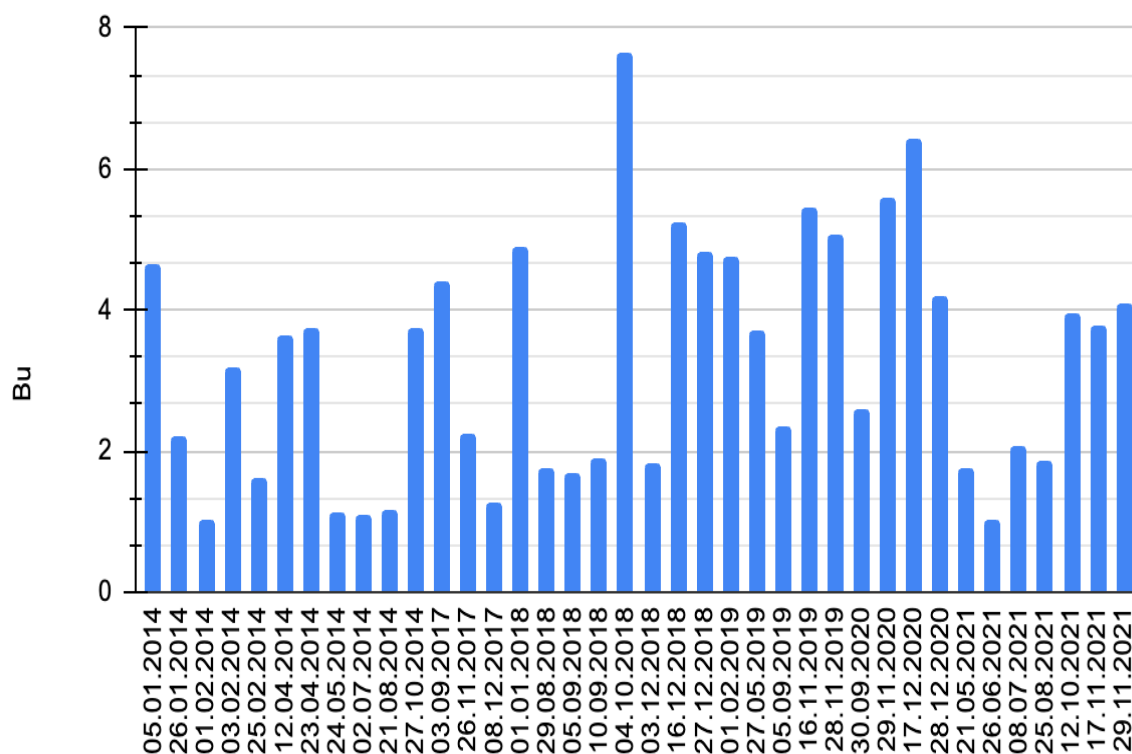


Рисунок 3.2.4 Значения чисел Бюргера для каждой даты

Как было сказано ранее что ЧБ может больше 1 свидетельствует о том что блокировка может произойти и такие препятствия считаются гидродинамически крутыми, даже при том что обратное ЧФ меньше 1. В соответствии с результатами расчета обоих чисел показанных на рисунке 3.2.3 и рисунке 3.2.4, можно заметить что ЧФ много меньше 1, но при этом на спктниковых снимкам отчетливо различается бора, таким образом сказать что для байкальской боры на западном берегу(горная и сарма) ЧБ будет более значимым, чем ЧФ при исследовании.

В подтверждение этого рассмотрим снимки и карты скорости которые покажут наличие боры.

Первый случай был найден 29.11.2021 года в 23:00 по UTC. На рисунке 3.2.5 видны потоки холодного воздуха вырывающиеся с суши на водную поверхность что свидетельствует налчию боры, также скорости ветра, 10-14 м/с, показанные рисунке 3.2.6 свидетельствуют о налчии боры.

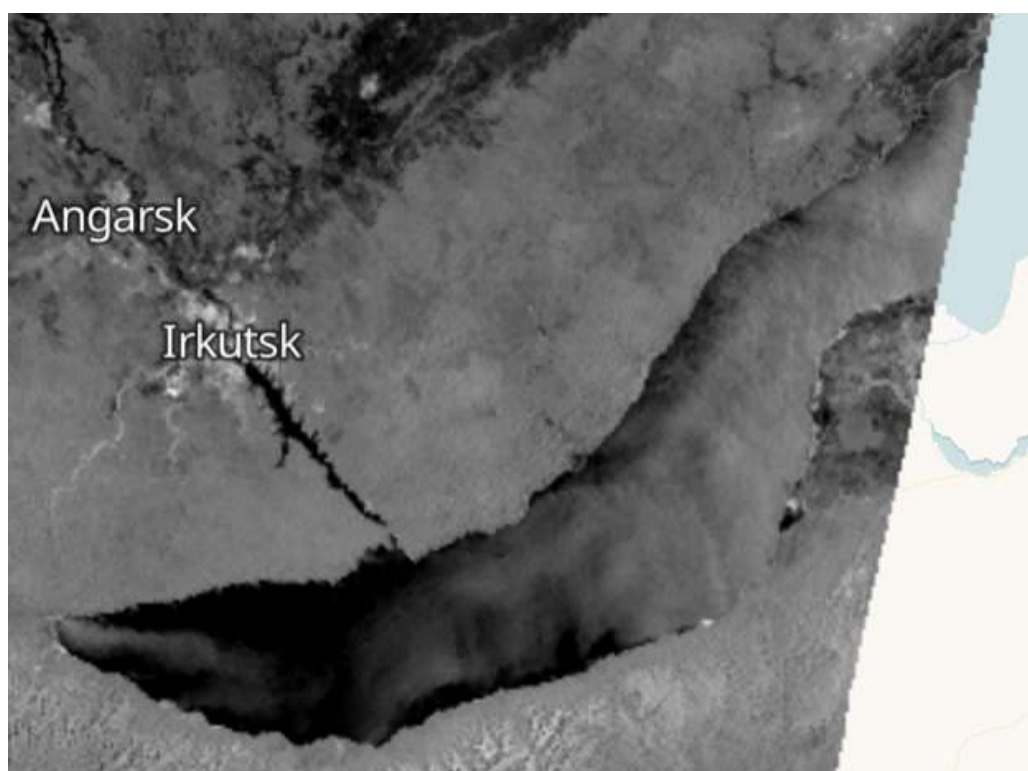


Рисунок 3.2.5 Снимок Sentinel-1 29.11.2021 года в 23:00 по UTC

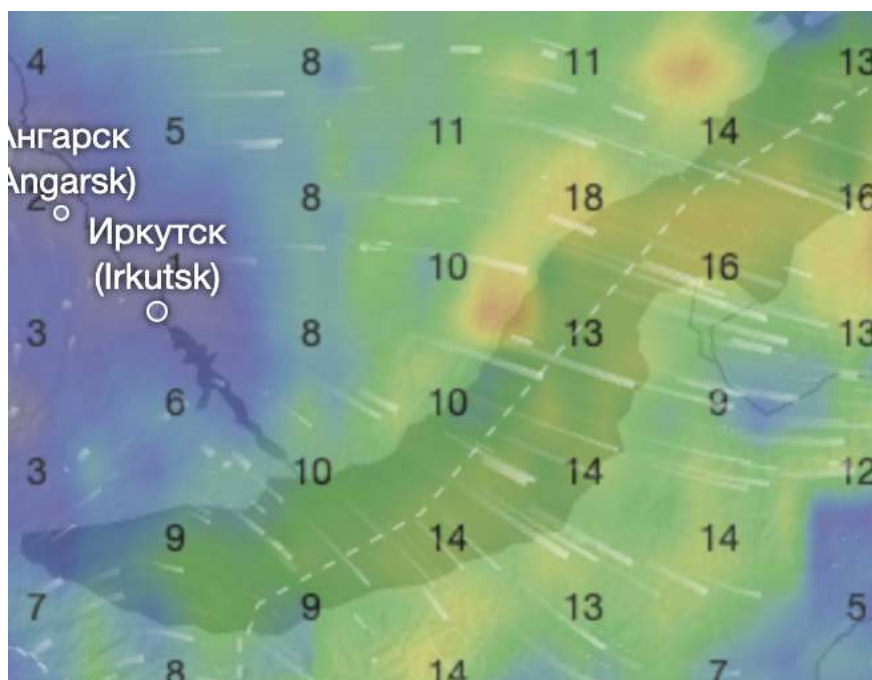


Рисунок 3.2.6 Скорость ветра на 29.11.2021 года

Второй случай был найден 28.12.2020 года в 22:50 по UTC. На рисунке 3.2.7 видны потоки холодного воздуха вырывающиеся с суши на водную поверхность что также свидетельствует на наличие боры. Скорости ветра, 13-21 м/с, показанные на рисунке 3.2.8 говорят на наличие боры.

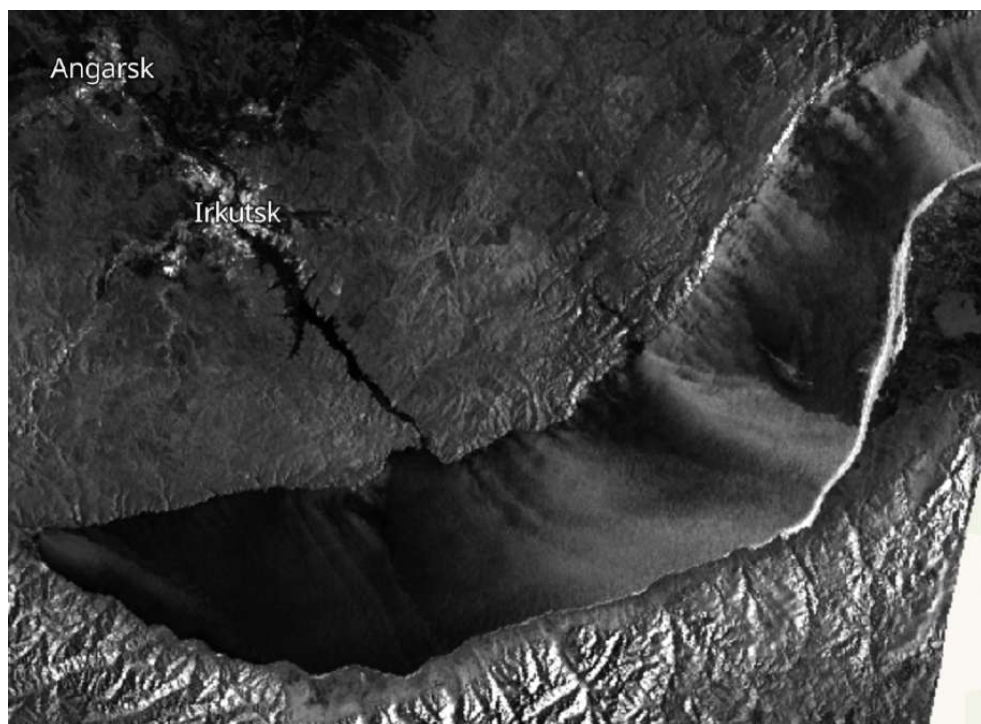


Рисунок 3.2.7 Снимок Sentinel-1 28.12.2020 года в 22:50 по UTC

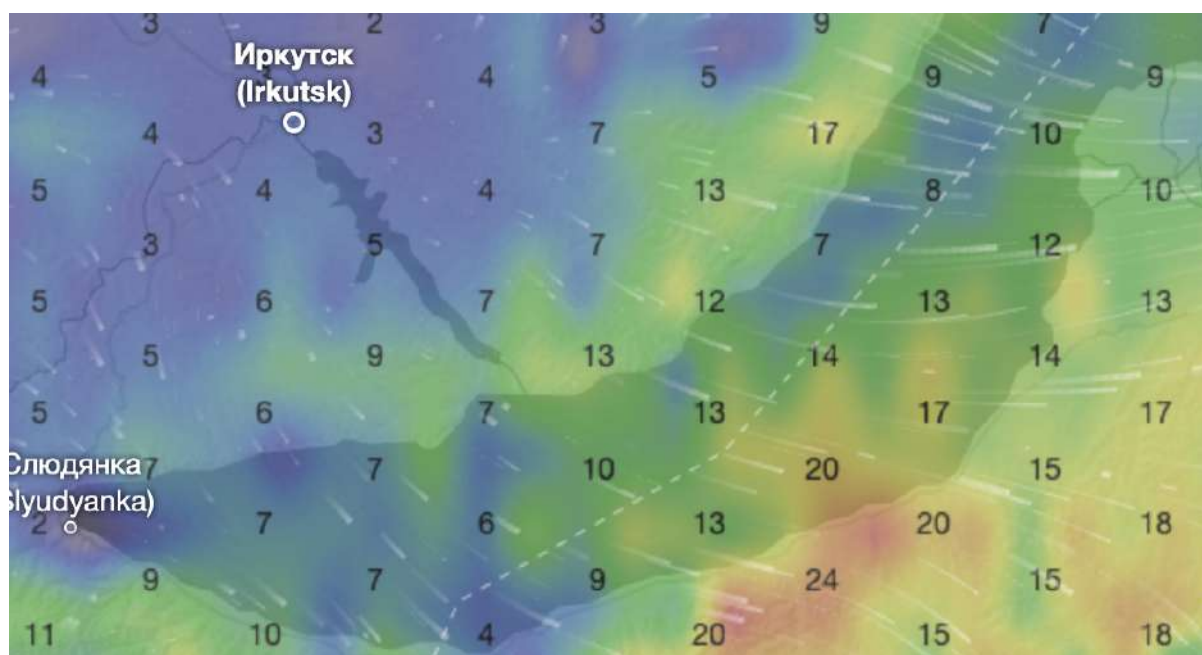


Рисунок 3.2.8 Скорость ветра на 28.12.2020 года

Третий случай был найден 29.11.2020 года в 23:00 по UTC. На рисунке 3.2.9 видны потоки холодного воздуха вырывающиеся с суши на водную поверхность что также свидетельствует на наличие боры. Скорости ветра, 14-18 м/с, показанные рисунке 3.2.10 говорят на наличии боры.

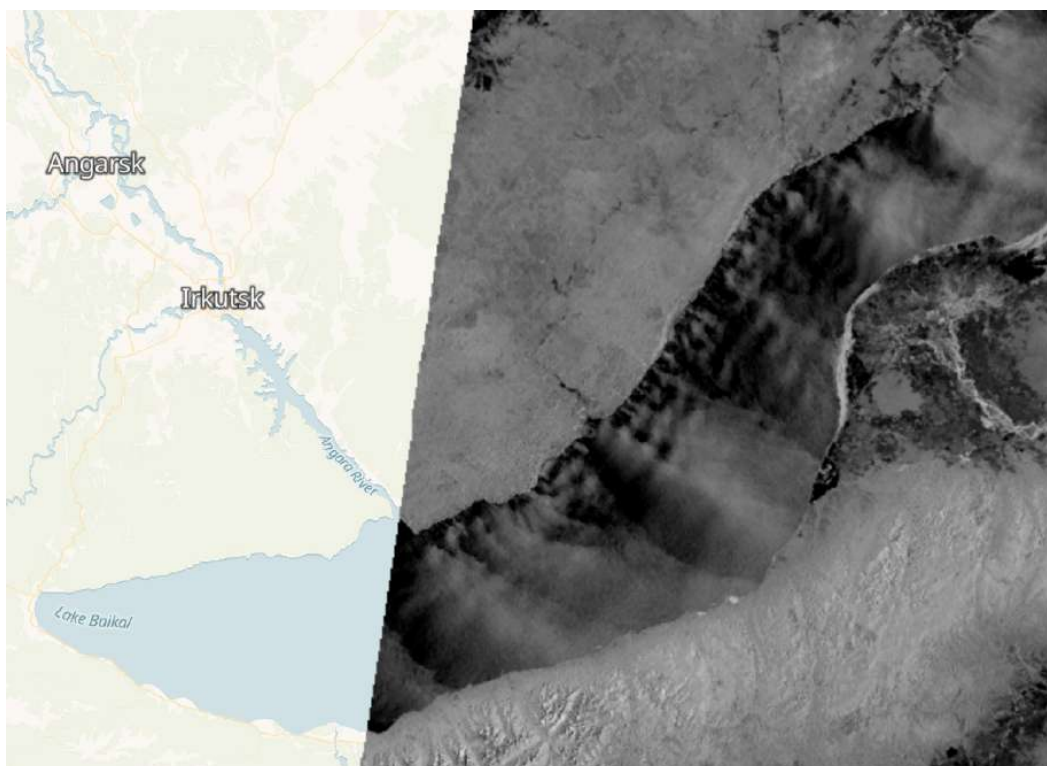


Рисунок 3.2.9 Снимок Sentinel-1 29.11.2020 года в 23:00 по UTC

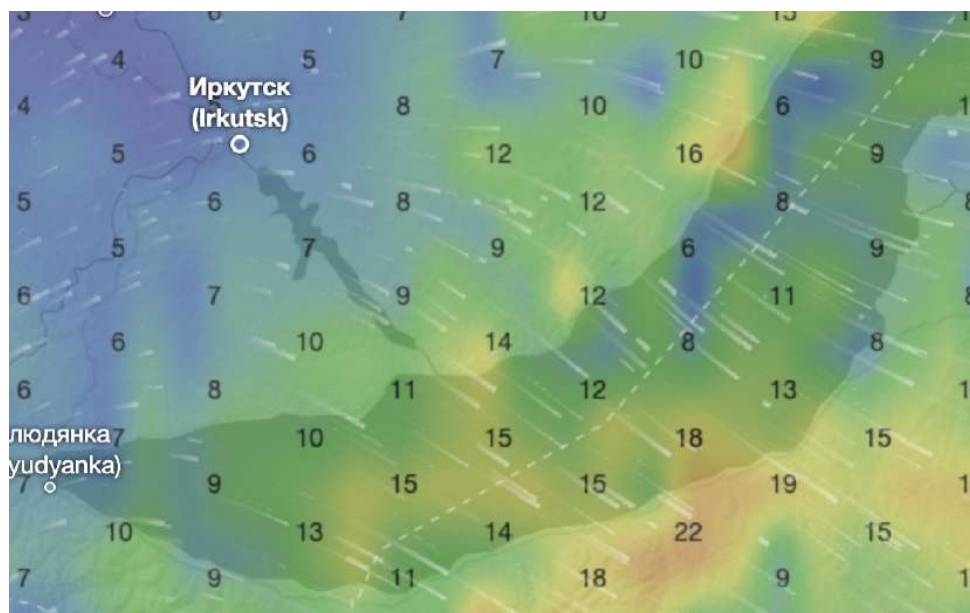


Рисунок 3.2.10 Скорость ветра на 29.11.2020 года

Четвертый случай был найден 30.09.2020 года в 23:00 по UTC. На рисунке 3.2.11 видны потоки холодного воздуха вырывающиеся с суши на водную поверхность что также свидетельствует на наличие боры. Скорости ветра, 9-16 м/с, показанные рисунке 3.2.12 говорят налчиии боры.

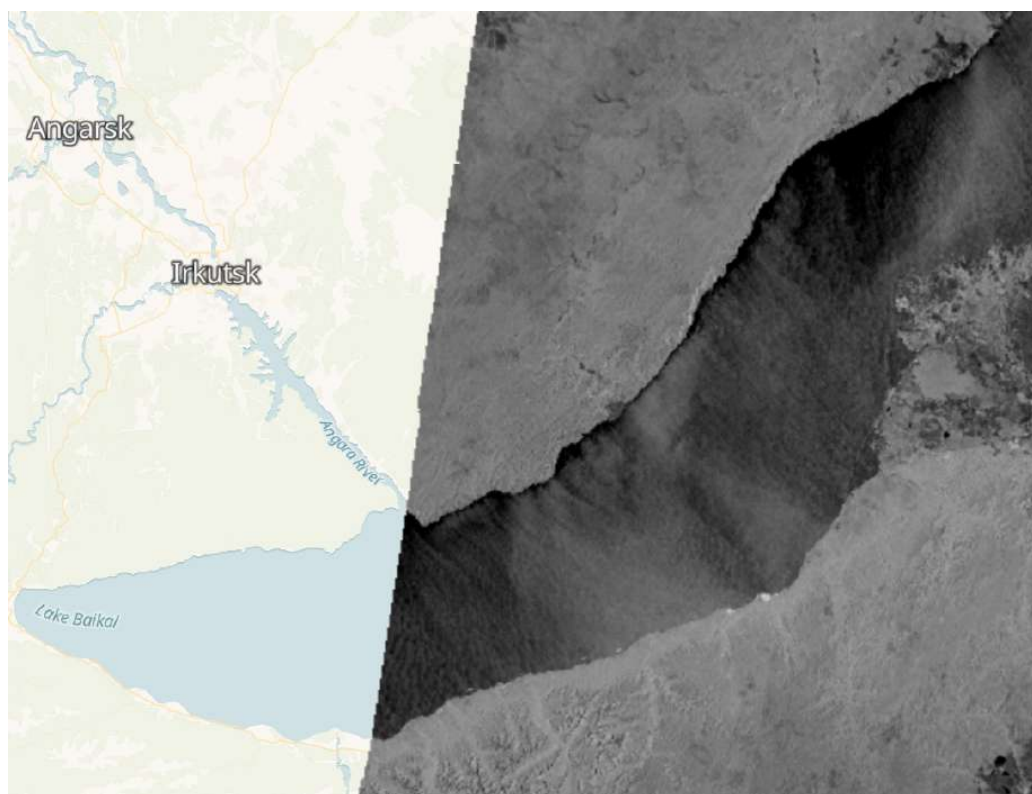


Рисунок 3.2.11 Снимок Sentinel-1 30.09.2020 года в 23:00 по UTC

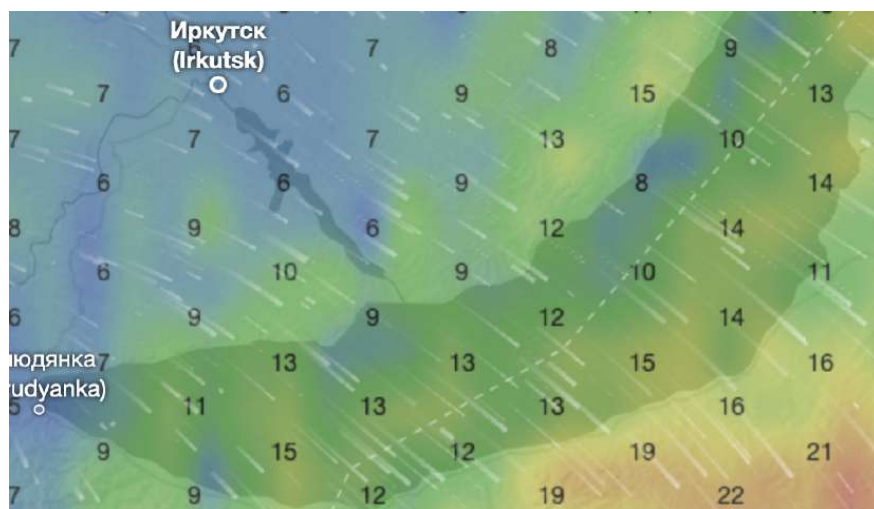


Рисунок 3.2.12 Скорость ветра на 30.09.2020 года

Пятый случай который рассмотрим, за 16.11.2019 года в 23:00 по UTC. На рисунке 3.2.13 видны потоки холодного воздуха вырывающиеся с суши на водную поверхность что также свидетельствует налчию боры. Скорости ветра, 14-18 м/с, показанные рисунке 3.2.14 говорят налчию боры.

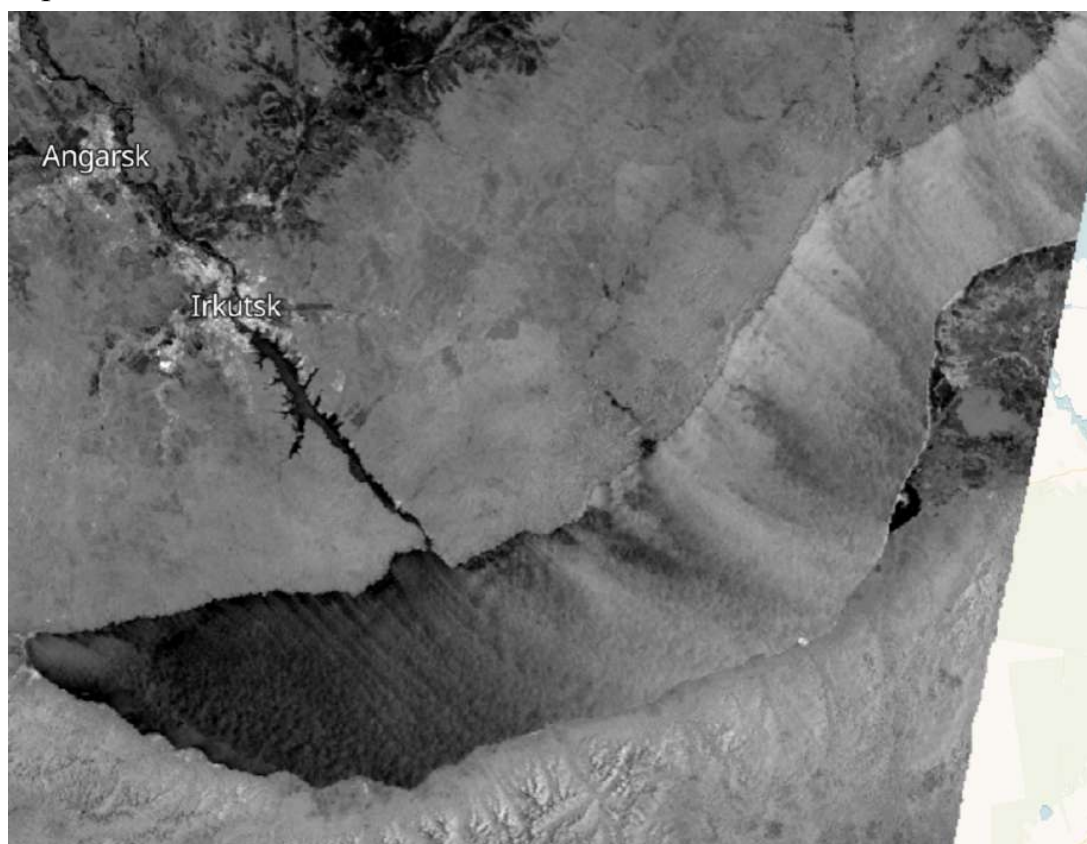


Рисунок 3.2.13 Снимок Sentinel-1 16.11.2019 года в 23:00 по UTC

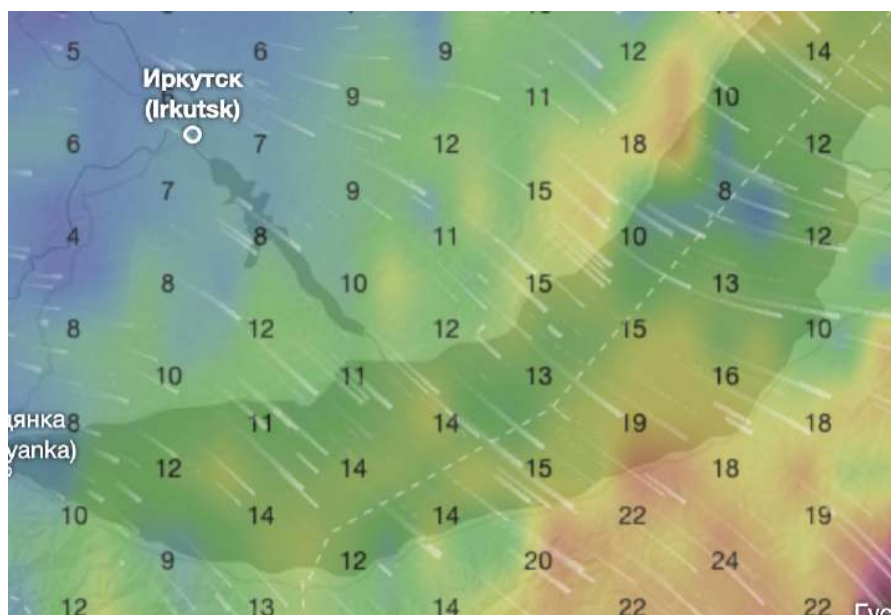


Рисунок 3.2.14 Скорость ветра на 16.11.2019 года

Шестой случай который рассмотрим, за 27.05.2019 года в 23:00 по UTC. На рисунке 3.2.15 видны потоки холодного воздуха вырывающиеся с суши на водную поверхность что также свидетельствует на наличие боры. Скорости ветра, 14-18 м/с, показанные рисунке 3.2.16 говорят налчии боры.

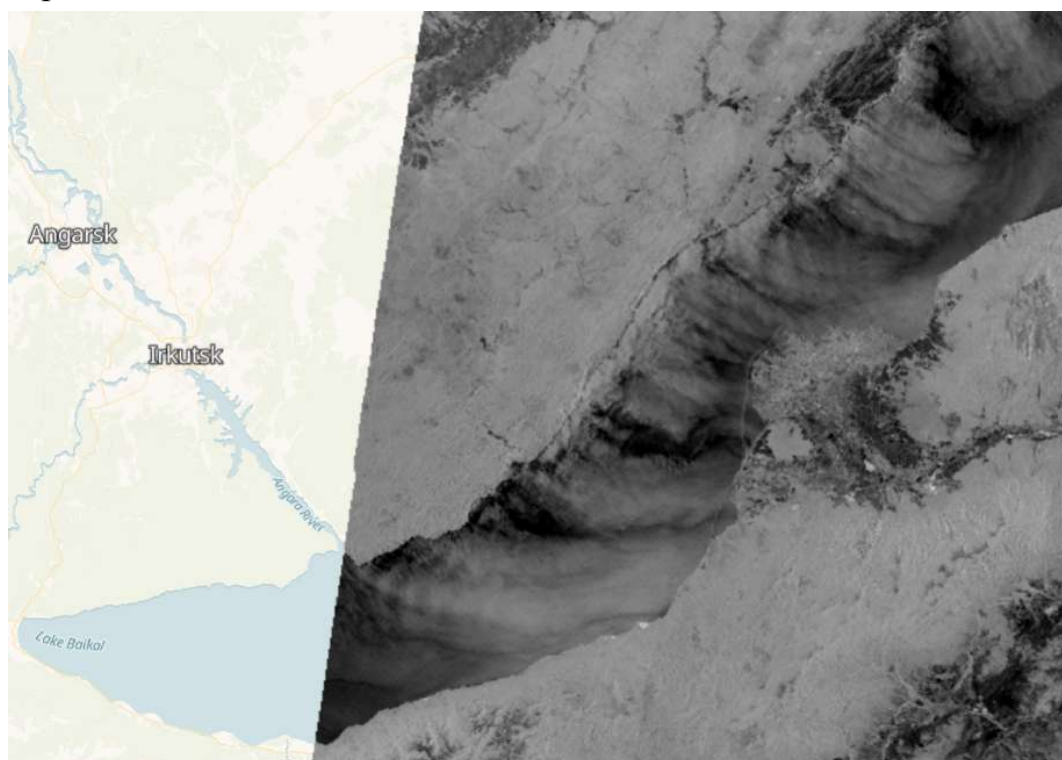


Рисунок 3.2.13 Снимок Sentinel-1 27.05.2019 года в 23:00 по UTC

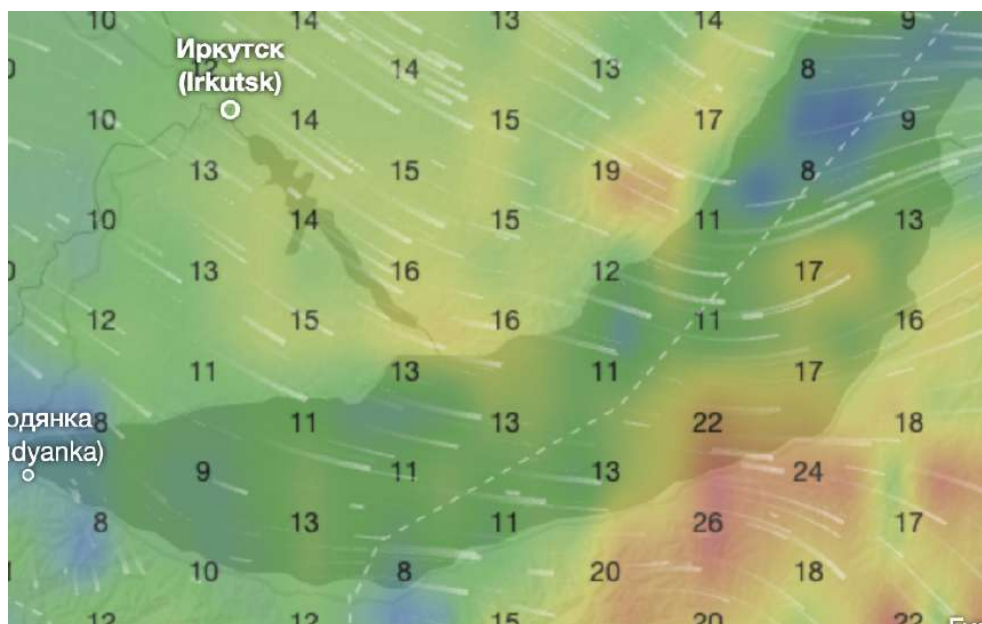


Рисунок 3.2.14 Скорость ветра на 27.05.2019 года

И последний случай который рассмотрим, за 26.11.2017 года в 23:00 по UTC. На рисунке 3.2.17 видны потоки холодного воздуха вырывающиеся с суши на водную поверхность что также свидетельствует налчию боры. Скорости ветра, 14-18 м/с, показанные рисунке 3.2.18 говорят налчию боры.

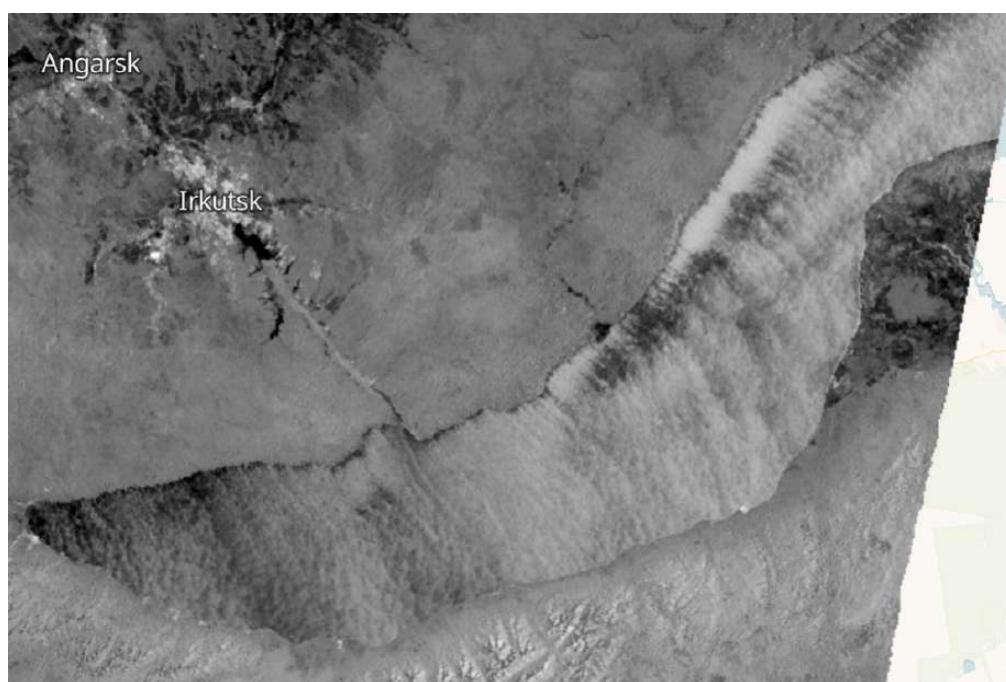


Рисунок 3.2.17 Снимок Sentinel-1 26.11.2017 года в 23:00 по UTC

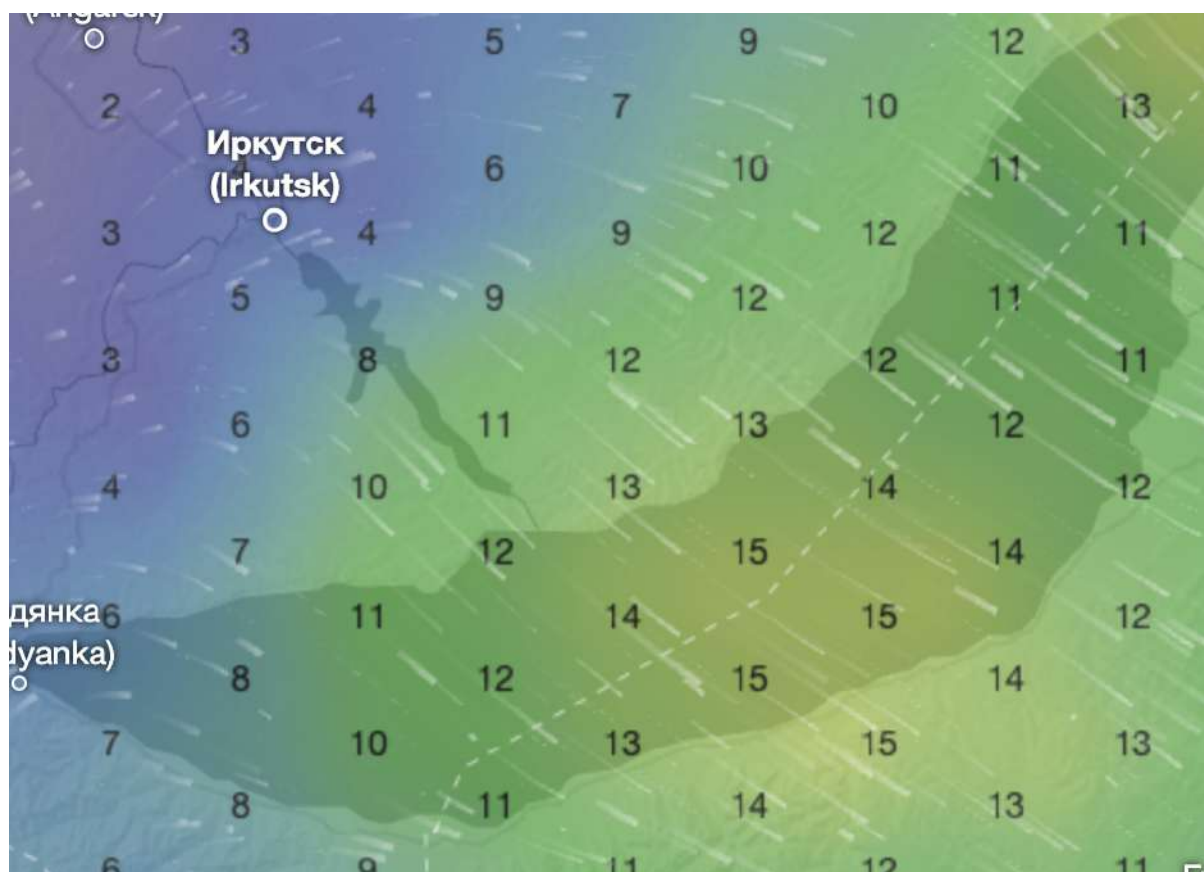


Рисунок 3.2.14 Скорость ветра на 26.11.2017 года

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы были получены и усовершенствованы навыки работы со спутниковыми снимками, получен опыт в исследовании бороподных вертов Байкала.

В процессе работы были собраны статистические данные: спутниковые снимки, данные с аэрологической станции в Ангарске и данные по скоростям ветра, которые позволили выяснить что в первую очередь следует учитывать при дальнейшем изучении и исследовании байкальской боры.

В период 2014, 2017-2021 было выявлено 38 случаев боры на западном берегу озера Байкал. Также была рассчитана внутригодовая изменчивость повторяемости боры, анализ которой показал, что байкальская бора наблюдается преимущественно в холодные периоды года (осенью и зимой) - 27 случаев пришлось именно на эти сезоны года.

Были использованы спутниковые снимки со спутника Sentinel-1 и данные по скоростям ветра из ресурса Ventusky. Эти данные были использованы для дешифрирования байкальской боры. Сопоставляя спутниковые снимки, данные по ветру и полученные значения чисел Фруда и Бюргера, можно прийти к выводу о том, что первозначимой характеристикой для байкальской боры на западном берегу является число Бюргера.

Во всех случаях число Бюргера было более единицы, таким образом это свидетельствует о том, что блокировка может произойти, и такие препятствия, в нашем случае это горный рельеф западного берега, будет считаться гидродинамически крутыми, даже при том, что обратное число Фруда меньше 1.

Значения числа Фруда ни в одном случае не превышало 1.

Поиск случаев для статистики и подготовка данных для проведения дальнейших расчетов, были автоматизированы с помощью написания скриптов на языке программирования Ruby, что позволило быстрее обрабатывать и манипулировать данными.

Исследование бороподобного ветра Байкала «Горная», дало ценные сведения о ее характеристиках и поведении. Также были выявлены значимые характеристики для диагностирования частичной блокировки потока, набегающего на препятствие при байкальской боре, наблюдаемой на западном берегу, и различные климатические факторы, такие как скорость и направление ветра, температура и влажность. Полученные

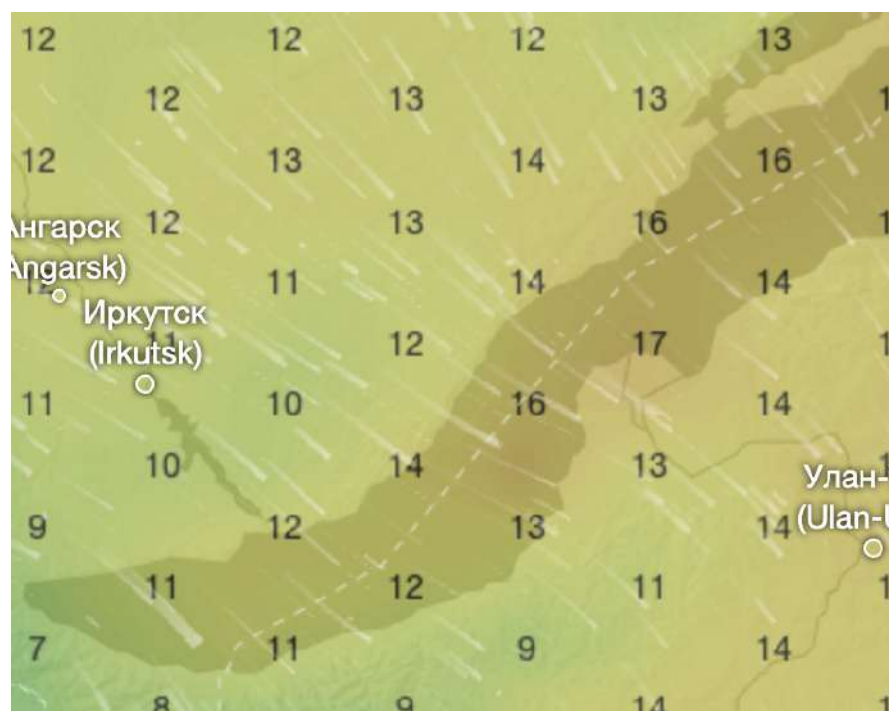
данные позволят в дальнейшем проводить более глубокое изучение природного явления байкальской боры и ее влияния на окружающую среду и местный климат.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

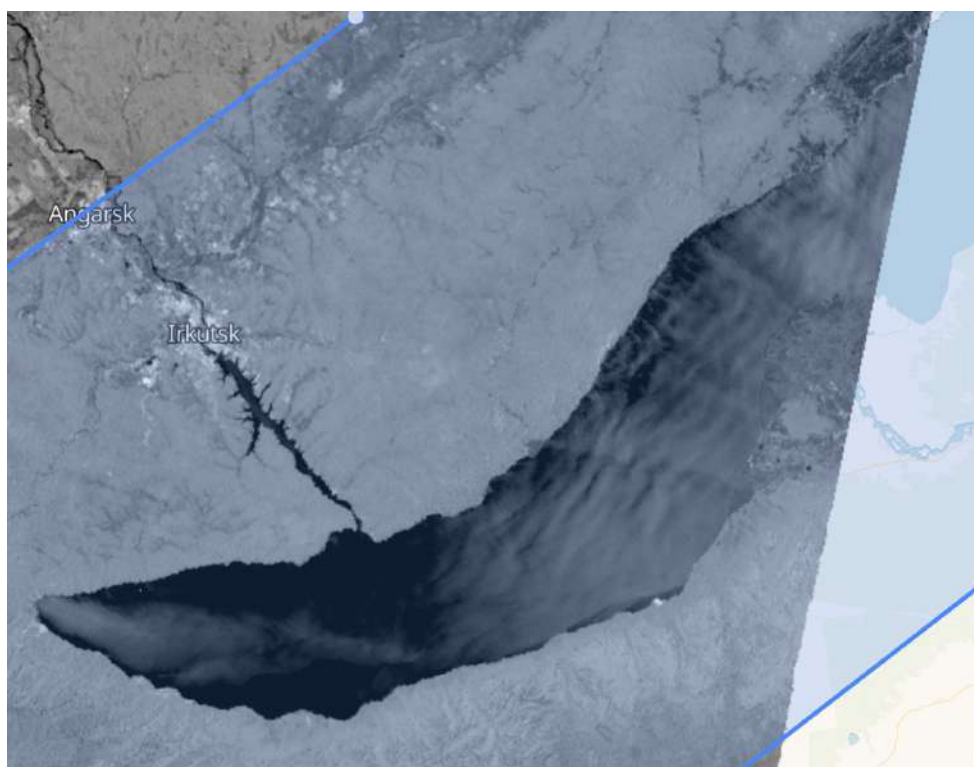
- [1] «Ветер, ветер на всем божьем свете...» О природе местных кататических ветров. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_17906225\\_17013070.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_17906225_17013070.pdf)
- [2] Новороссийская бора и байкальская сарма. [Электронный ресурс]. URL: <http://meteoweb.ru/phen060.php#:~:text=%D0%97%D0%B8%D0%BC%D0%BE%D0%B9%20%D0%BD%D0%B0%D0%B4%20%D0%91%D0%B0%D0%B9%D0%BA%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%BC,%D0%BD%D0%B0%20%D0%BE%D0%BA%D1%82%D1%8F%D0%B1%D1%80%D1%8C%20%E2%80%93%D0%B4%D0%B5%D0%BA%D0%B0%D0%B1%D1%80%D1%8C>
- [3] Алисов Б.П., Дроздов О.А., Рубинштейн Е.С. Курс климатологии. - Л.: Гидрометеиздат, 1952. - Ч. 1 и 2. - 487 с.
- [4] Фён. [Электронный ресурс]. URL: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/99/Fen\\_schemat.svg/800px-Fen\\_schemat.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/99/Fen_schemat.svg/800px-Fen_schemat.svg.png)
- [5] Бурман Э.А. Местные ветры. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 342 с
- [6] Иванов А.Ю. НОВОРОССИЙСКАЯ БОРА: ВЗГЛЯД ИЗ КОСМОСА, 2008
- [7] Иванов А.Ю. МЕСТНЫЕ КАТАБАТИЧЕСКИЕ ВЕТРЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И ИХ НАБЛЮДЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКИ, [Электронный ресурс]. URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_41241612\\_47583901.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_41241612_47583901.pdf)
- [8] Карта с указанными видами ветра и их направлениями в акваториях: Чёрного, Адриатического, Средиземного и тд. морях. [Электронный ресурс]. URL: <https://stihi.ru/2015/11/15/2736>
- [9] Сарма: чем опасен «ветер-убийца» на Байкале [Электронный ресурс]. URL: <https://russian7.ru/post/sarma-chem-opasen-veter-ubiyca-na-bay/>
- [10] Ветра Байкала [Электронный ресурс]. URL: <https://baikalecotourism.ru/vetra>
- [11] Архивные фотографии озера Байкал [Электронный ресурс]. URL: <https://humus.livejournal.com/3727330.html?view=comments>
- [12] САМОЕ КРУПНОЕ КРУШЕНИЕ БАЙКАЛА [Электронный ресурс]. URL: <https://dzen.ru/a/XMLnRKd2MQCy2xXs>

- [13] Судно Могилев, выброшенное на берег [Электронный ресурс]. URL: <https://andcvet.narod.ru/irkutsk/05/asd51.html>
- [14] История кораблекрушений на Байкале [Электронный ресурс]. URL: <https://baikal.place/2017/05/25/shipwreck?ysclid=lwdl51qlun135941181>
- [15] Руководство по использованию спутниковых данных в анализе и прогнозе погоды/ Под ред. И.П. Ветлова, Н.Ф. Вельтищев. Л.: Гидрометеиздат, 1990
- [16] Что такое кatabатический ветер? [Электронный ресурс]. URL: <https://interparus.com/chto-takoe-katabaticheskij-veter/>
- [17] Картографическая основа. Карты озера Байкал. Атлас “Озеро Байкал”. Прошлое. Настоящее. Будущее. ФГУП “ВостСиб АГП”, 2005 г.
- [18] Березовский А. “Еще несколько слов о Байкале. Ветры Байкала” [Электронный ресурс]. URL: [http://mgeocs.ru/images/stati/Winds\\_of\\_Lake\\_Baikal.pdf](http://mgeocs.ru/images/stati/Winds_of_Lake_Baikal.pdf)
- [19] Прох Л.З. Словарь ветров. – Ленинград, Гидрометеиздат. 1983.
- [20] Markowski, P., Y. Richardson, Mesoscale Meteorology in Midlatitudes//Royal Meteorological Society, 2010

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



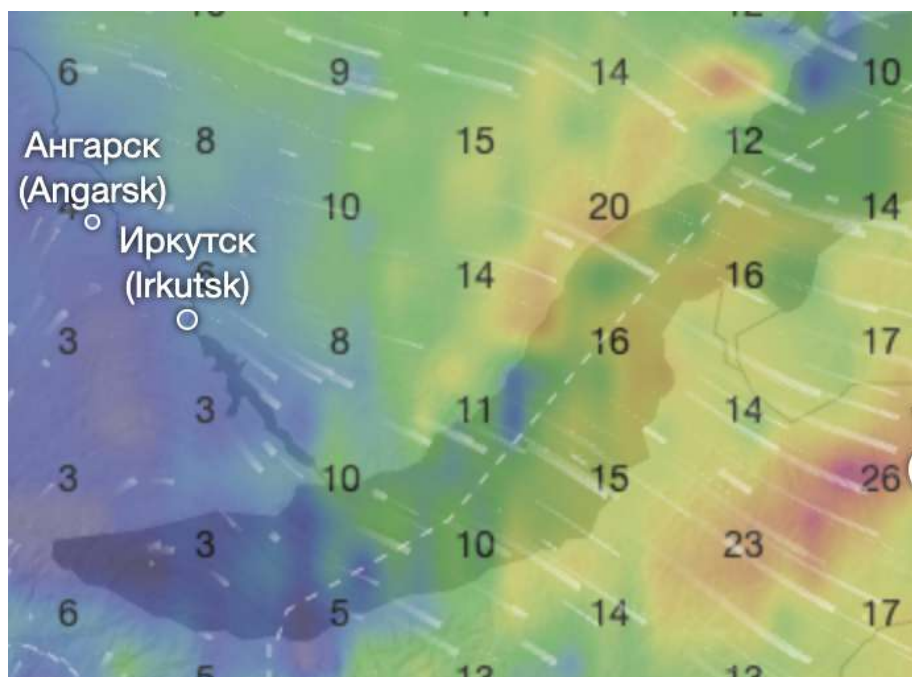
Карта распределения скорости ветра(м/с)



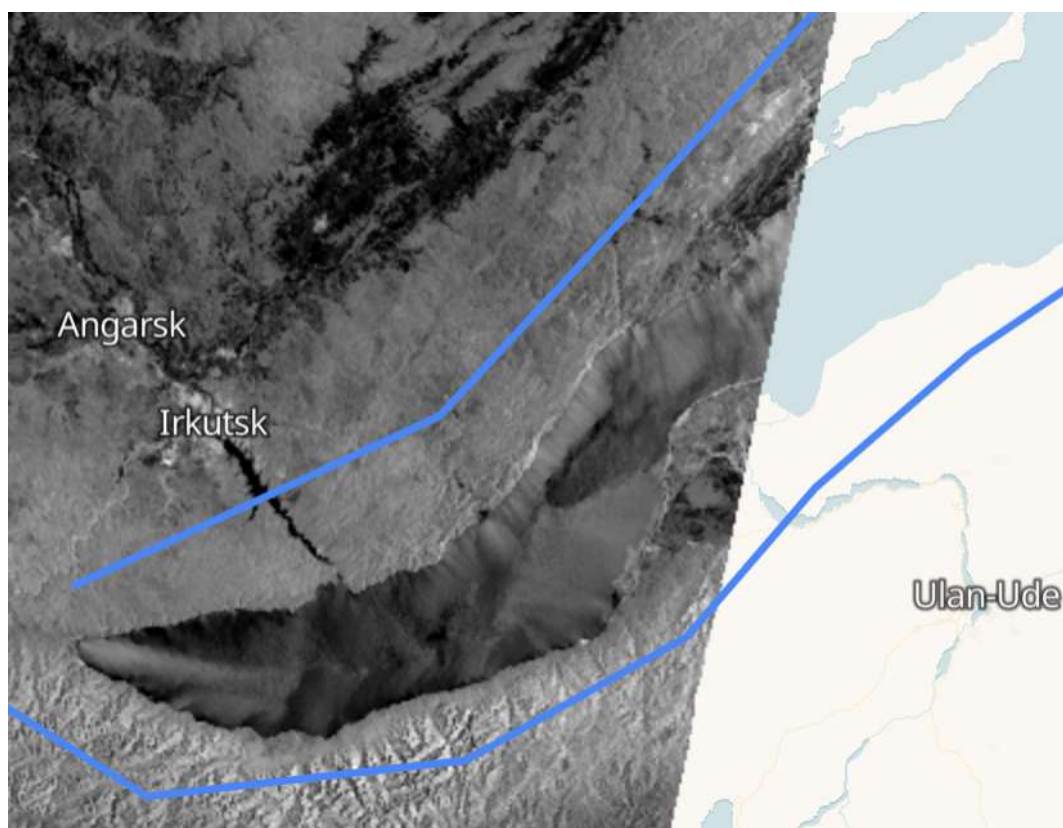
Спутниковый снимок Sentinel-1

Рисунок А.1 - Бора на озере Байкал. 08.09.2017 23:00 UTC

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



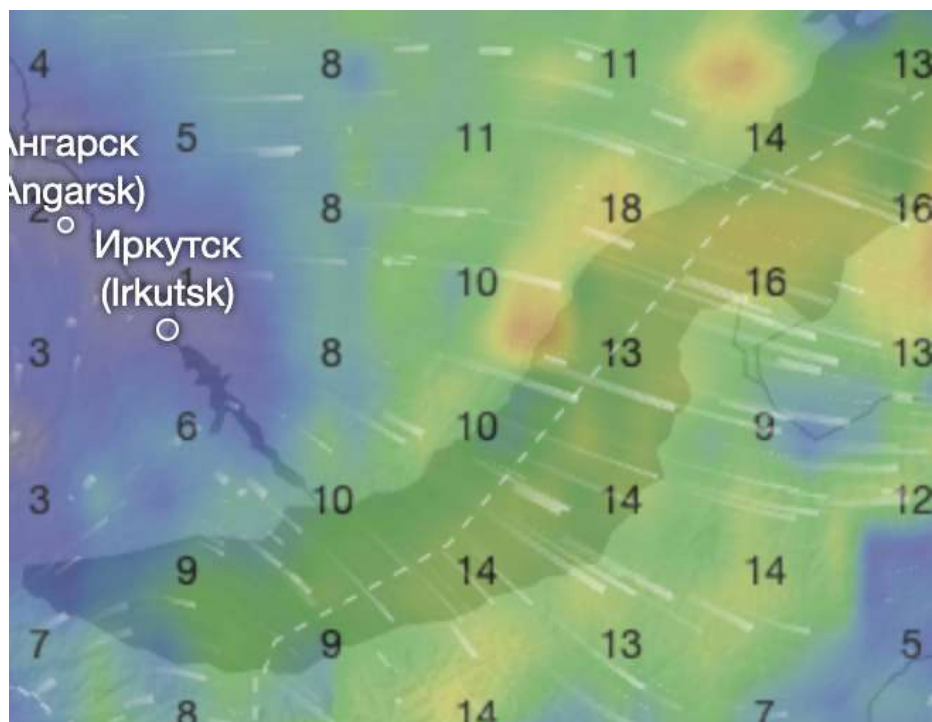
Карта распределения скорости ветра(м/с)



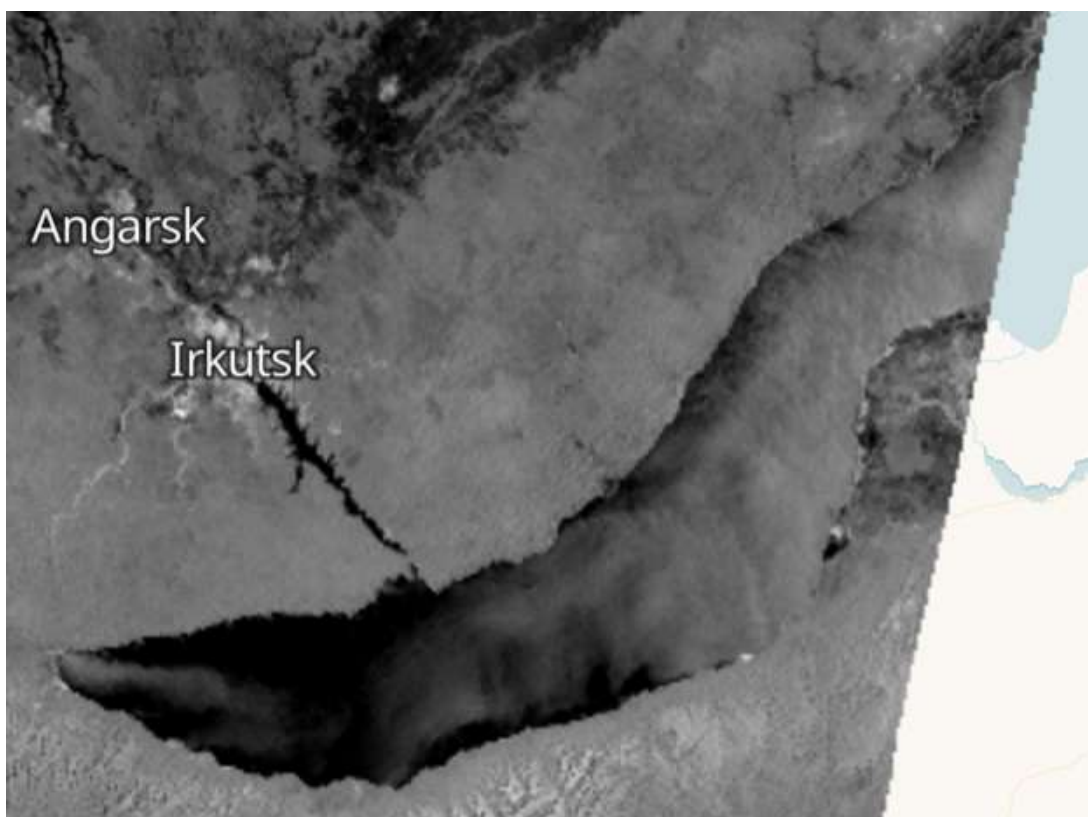
Спутниковый снимок Sentinel-1

Рисунок А.2 - Бора на озере Байкал. 03.12.2018 23:00 UTC

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



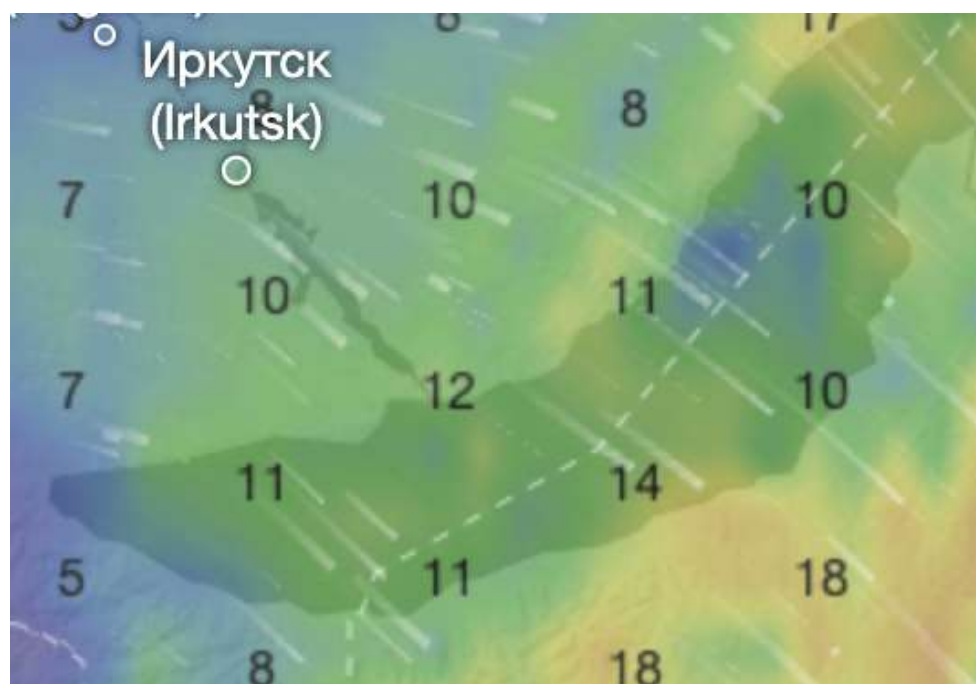
Карта распределения скорости ветра(м/с)



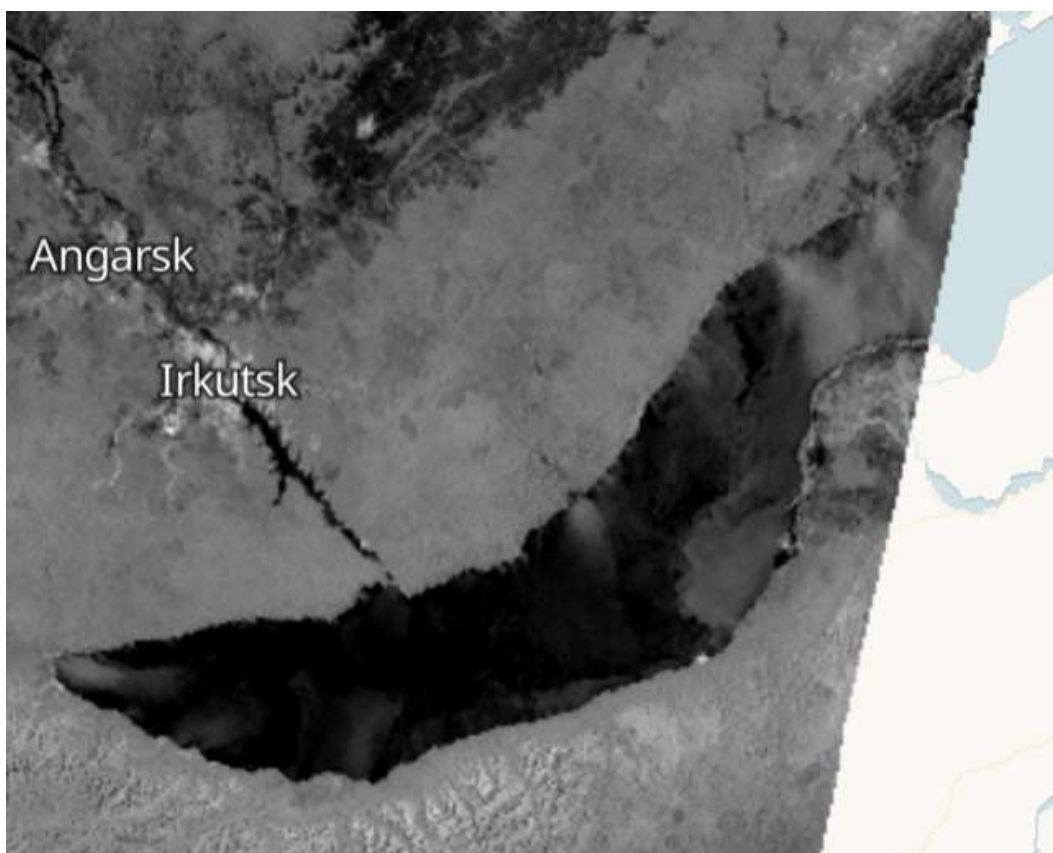
Спутниковый снимок Sentinel-1

Рисунок А.3 - Бора на озере Байкал. 29.11.2021 23:00 UTC

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



Карта распределения скорости ветра(м/с)



Спутниковый снимок Sentinel-1

Рисунок А.4 - Бора на озере Байкал. 17.11.2021 23:00 UTC

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

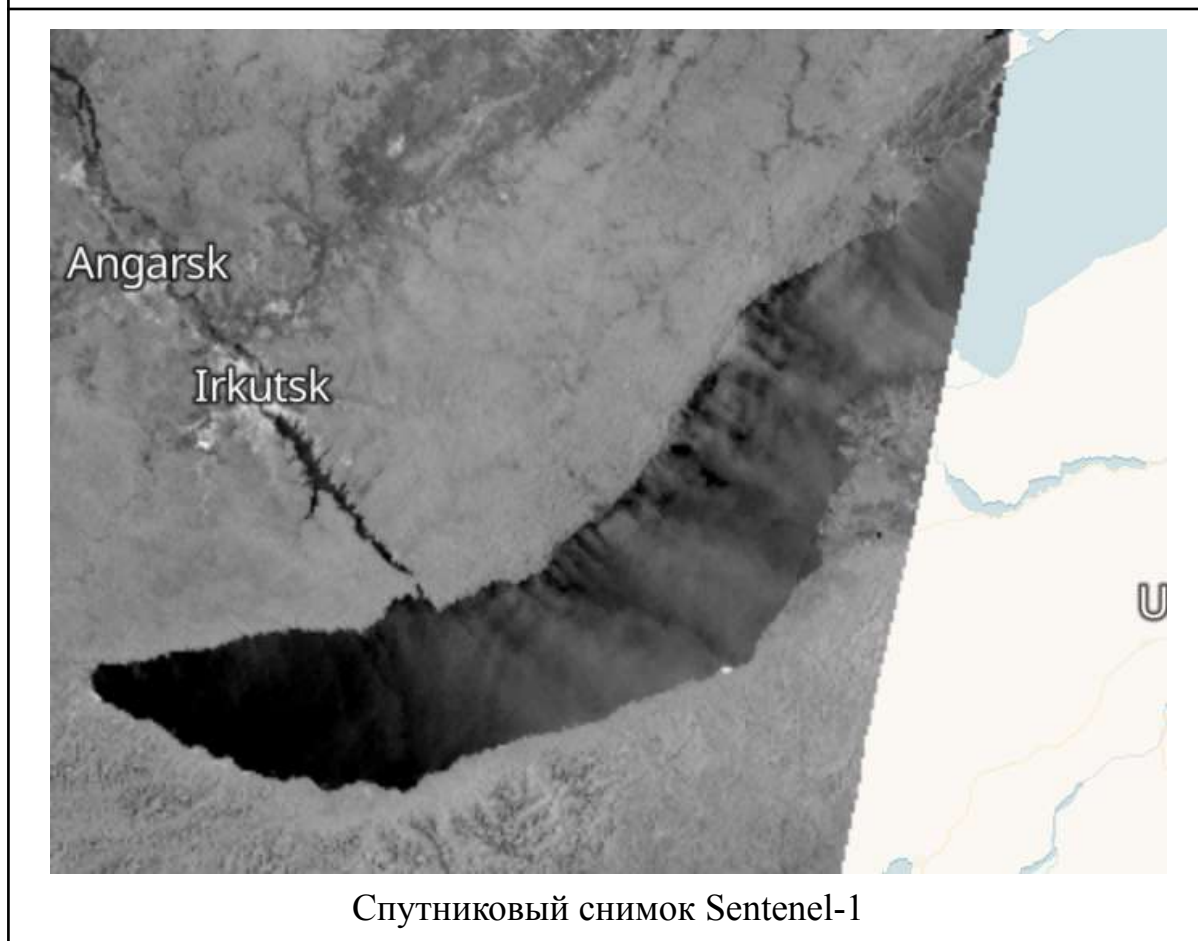
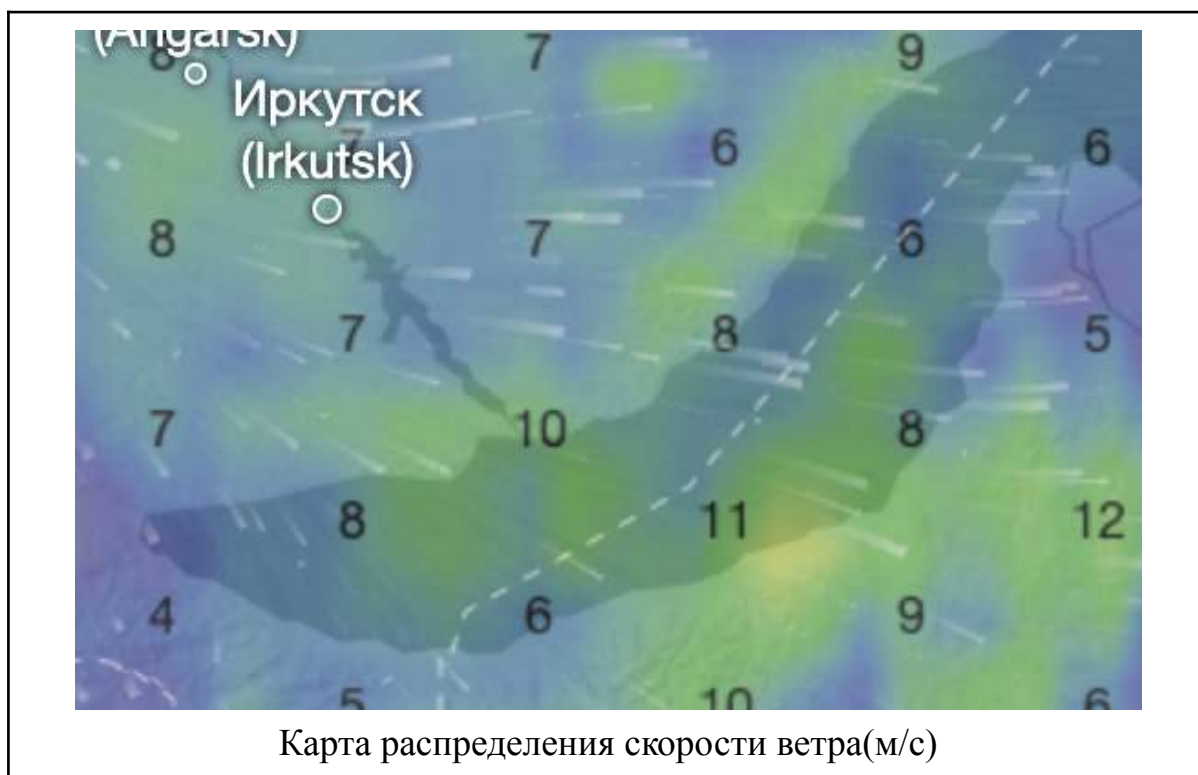


Рисунок А.5 - Бора на озере Байкал. 12.10.2021 23:00 UTC

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

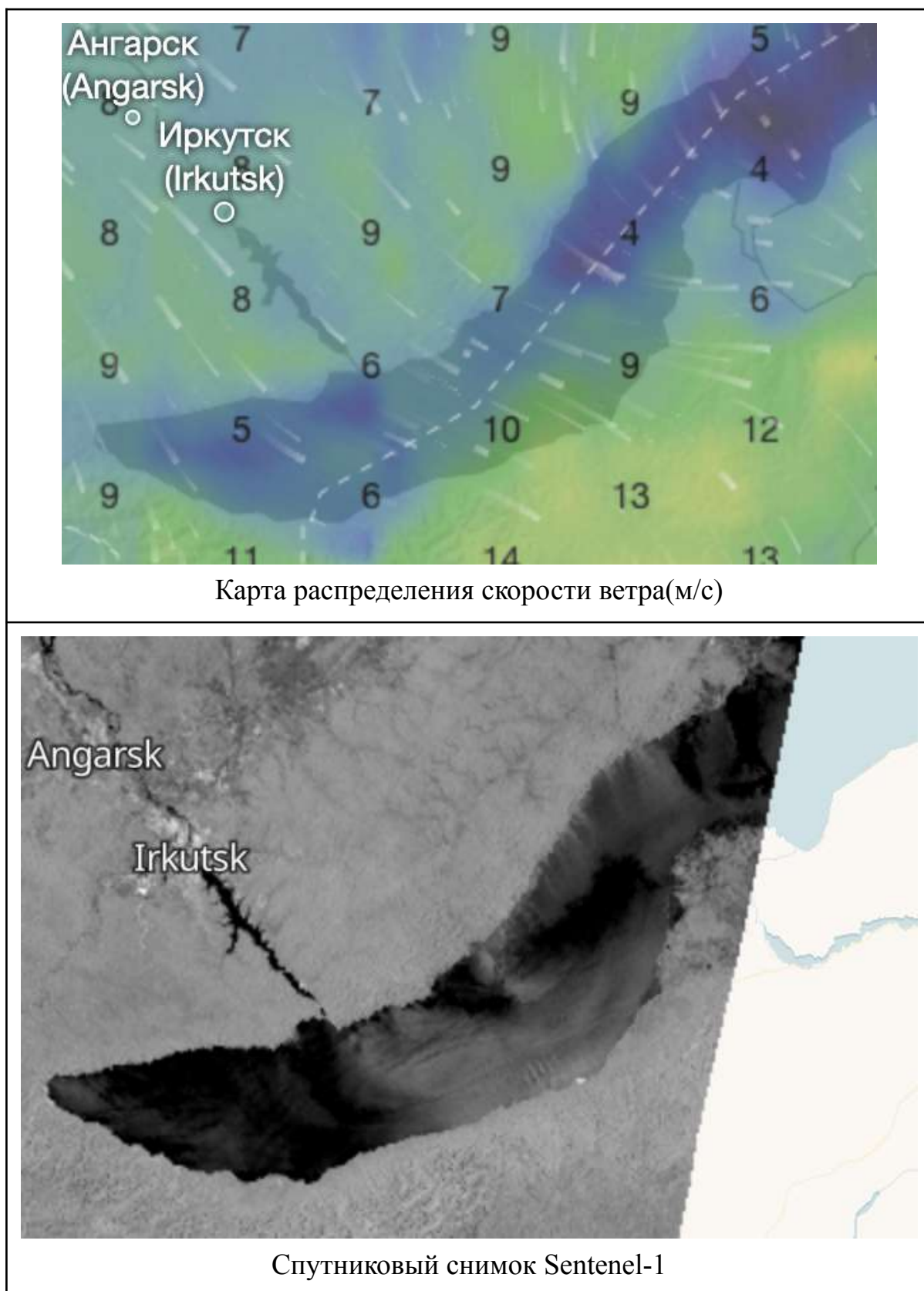
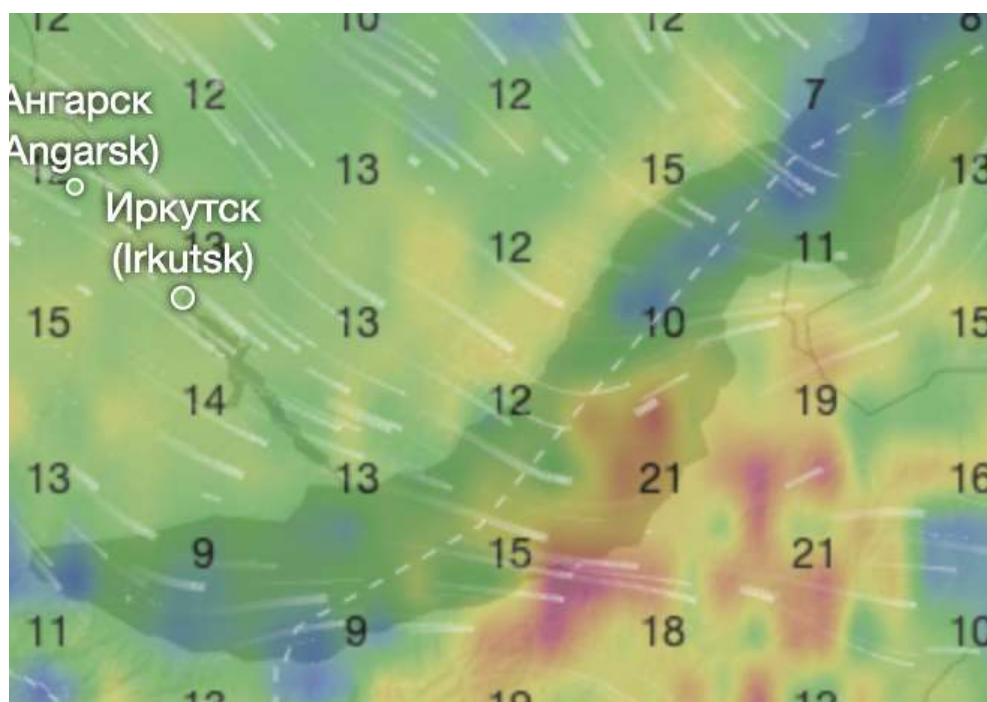
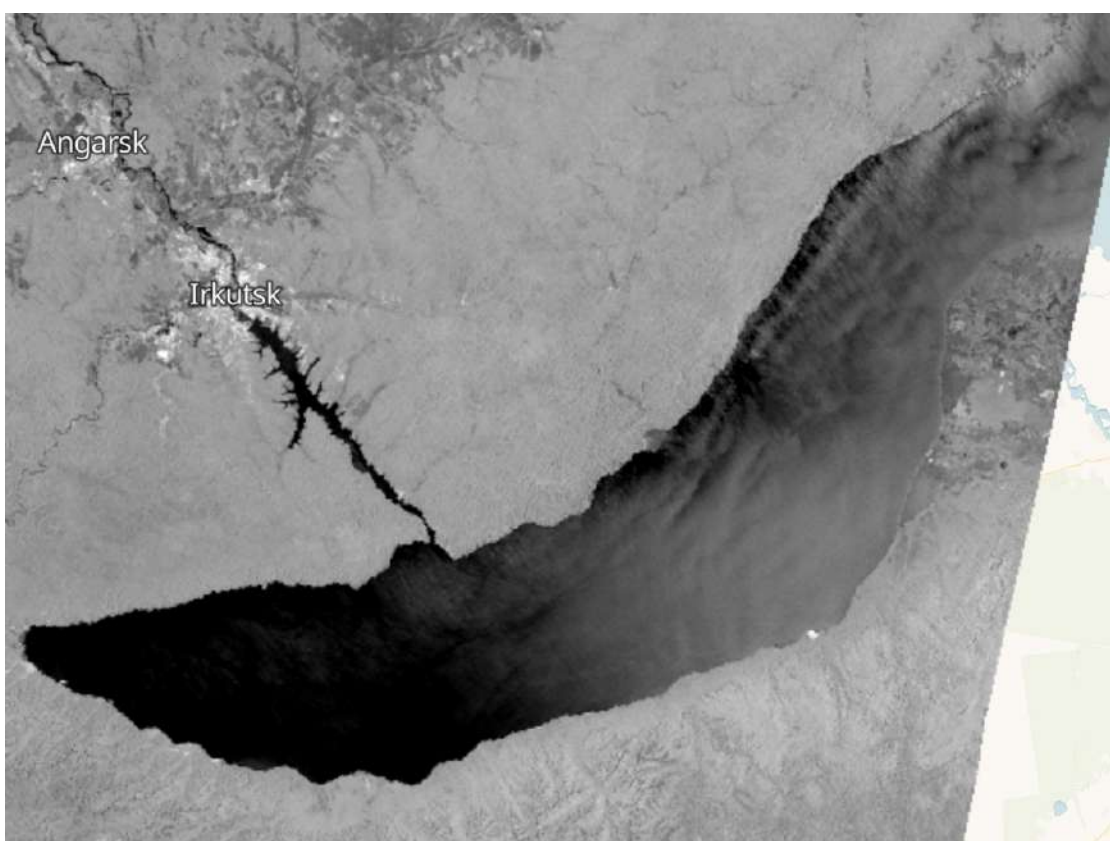


Рисунок А.6 - Бора на озере Байкал. 25.08.2021 23:00 UTC

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



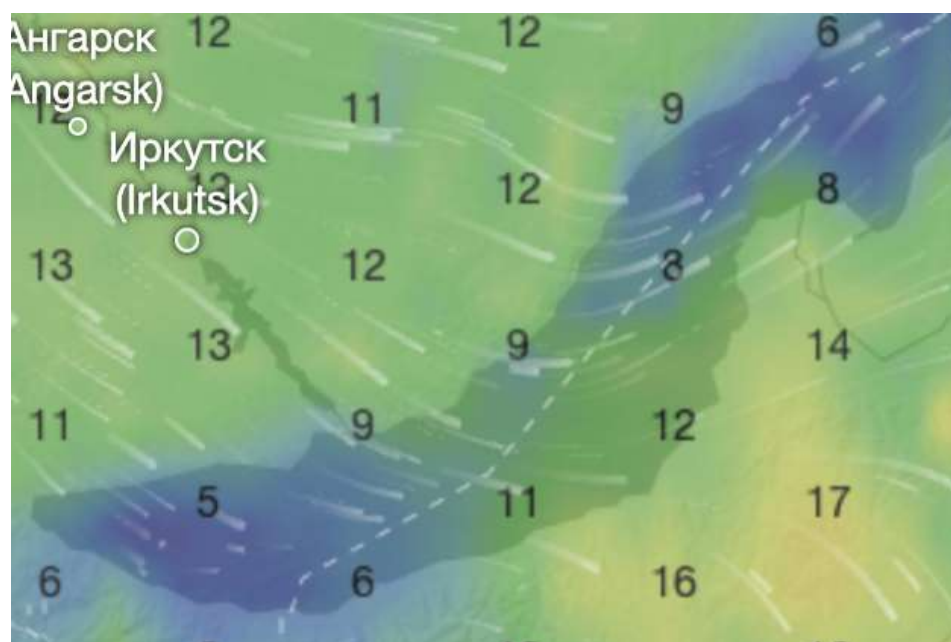
Карта распределения скорости ветра(м/с)



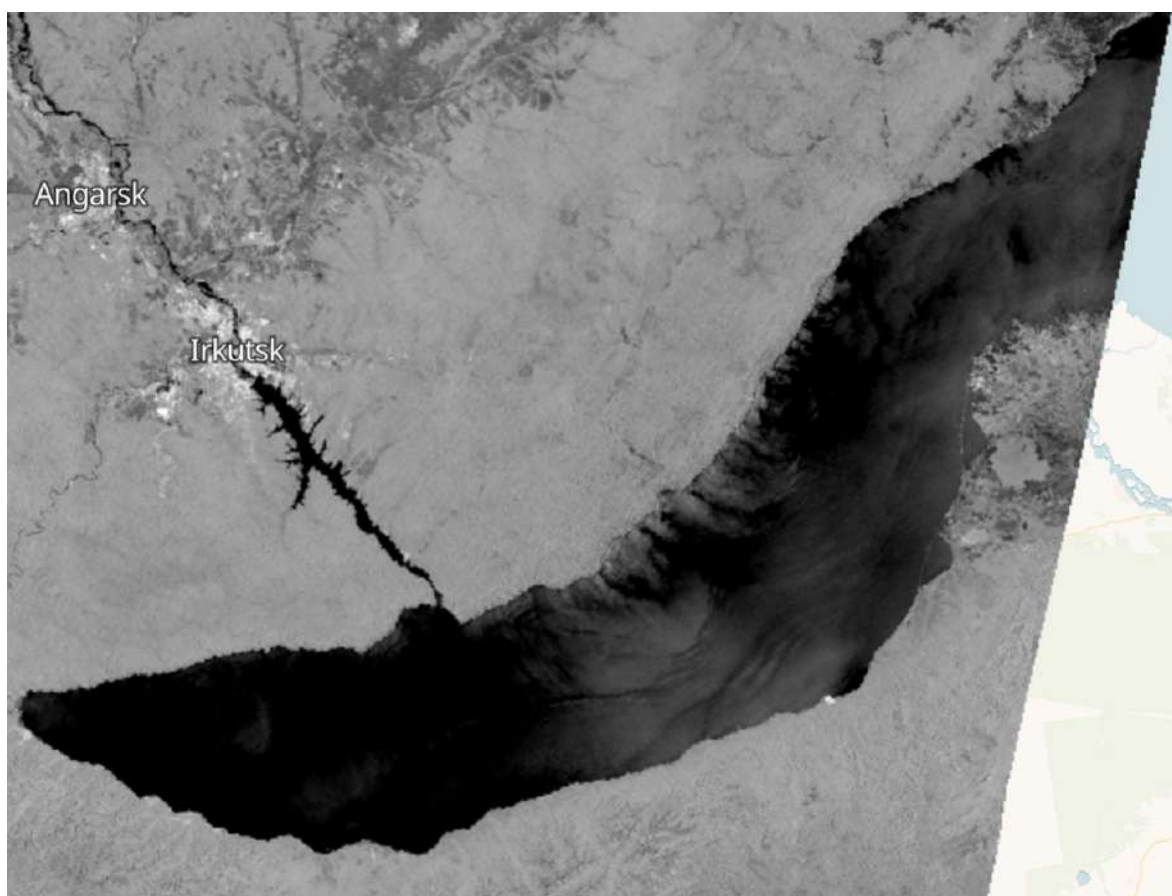
Спутниковый снимок Sentinel-1

Рисунок А.7 - Бора на озере Байкал. 08.07.2021 23:00 UTC

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



Карта распределения скорости ветра(м/с)



Спутниковый снимок Sentinel-1

Рисунок А.8 - Бора на озере Байкал. 26.06.2021 23:00 UTC

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

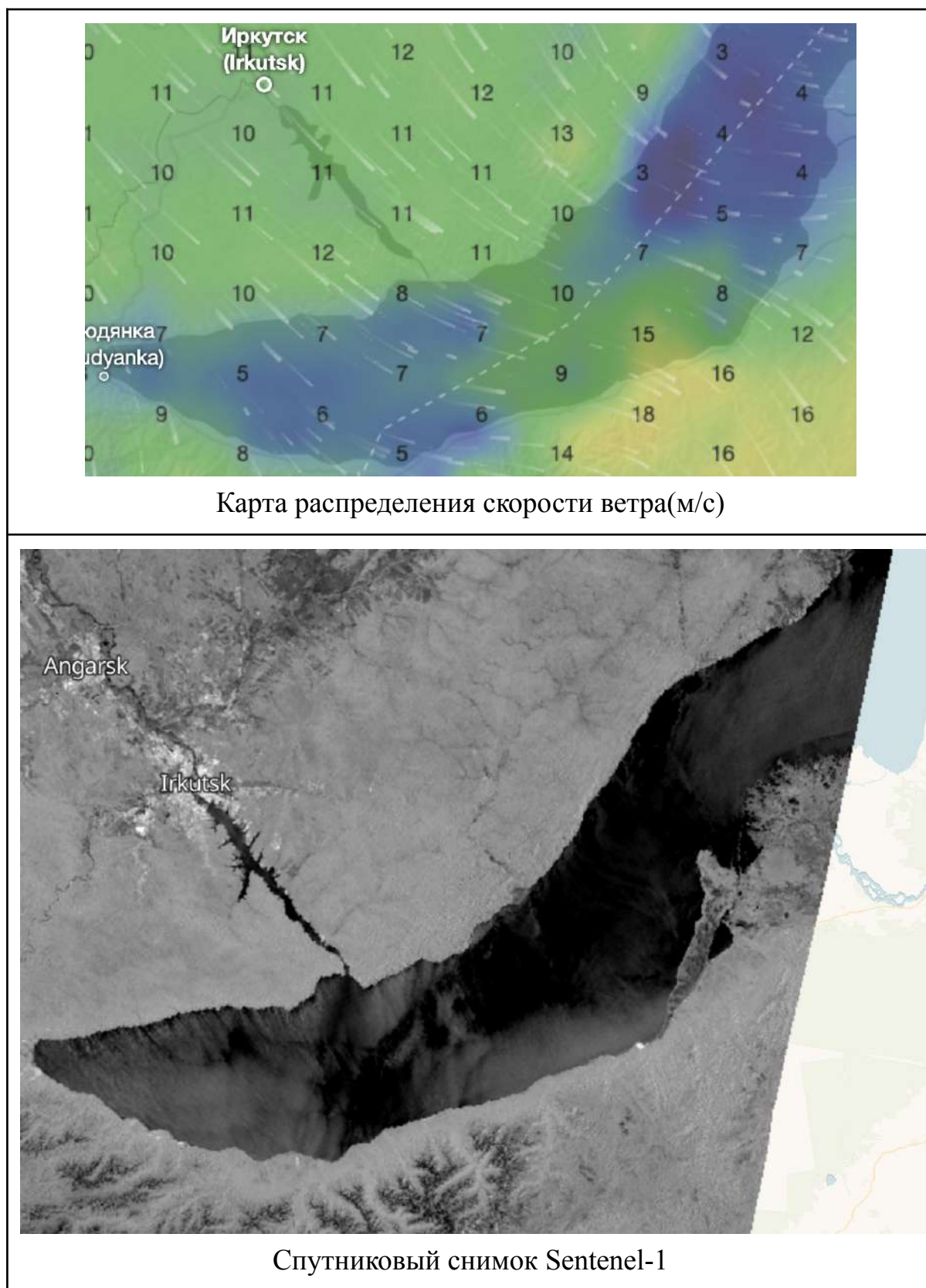
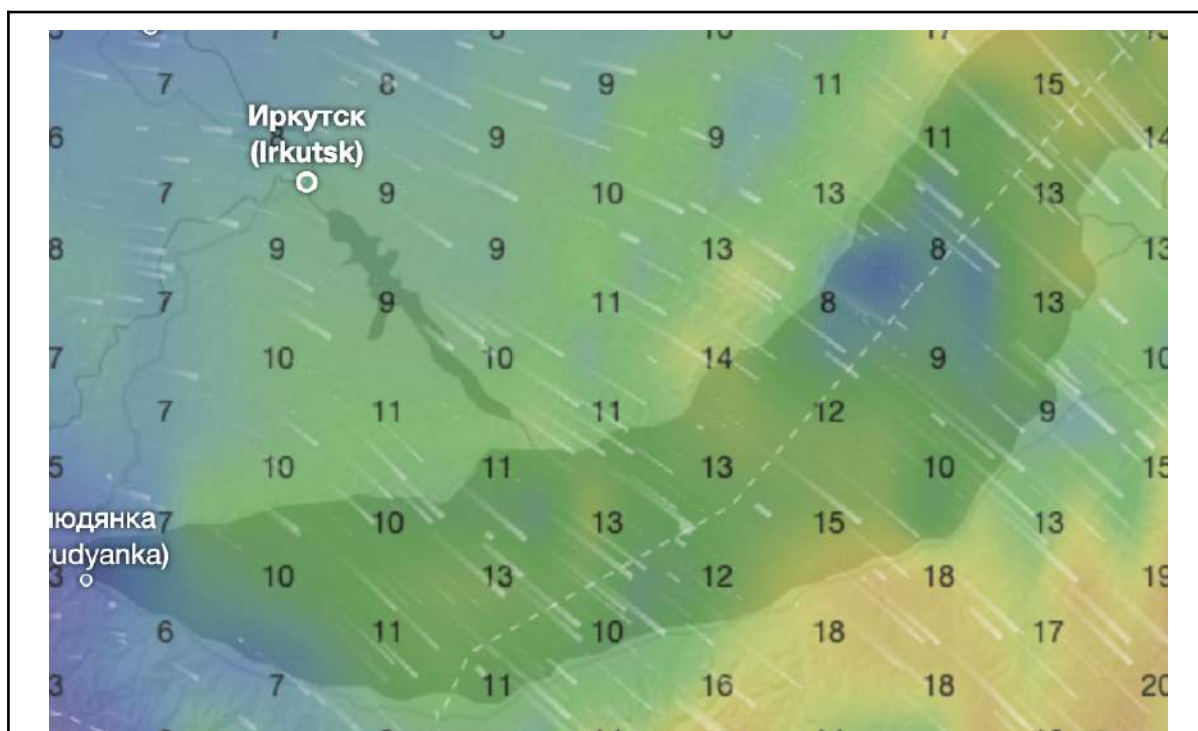


Рисунок А.9 - Бора на озере Байкал. 21.05.2021 23:00 UTC

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



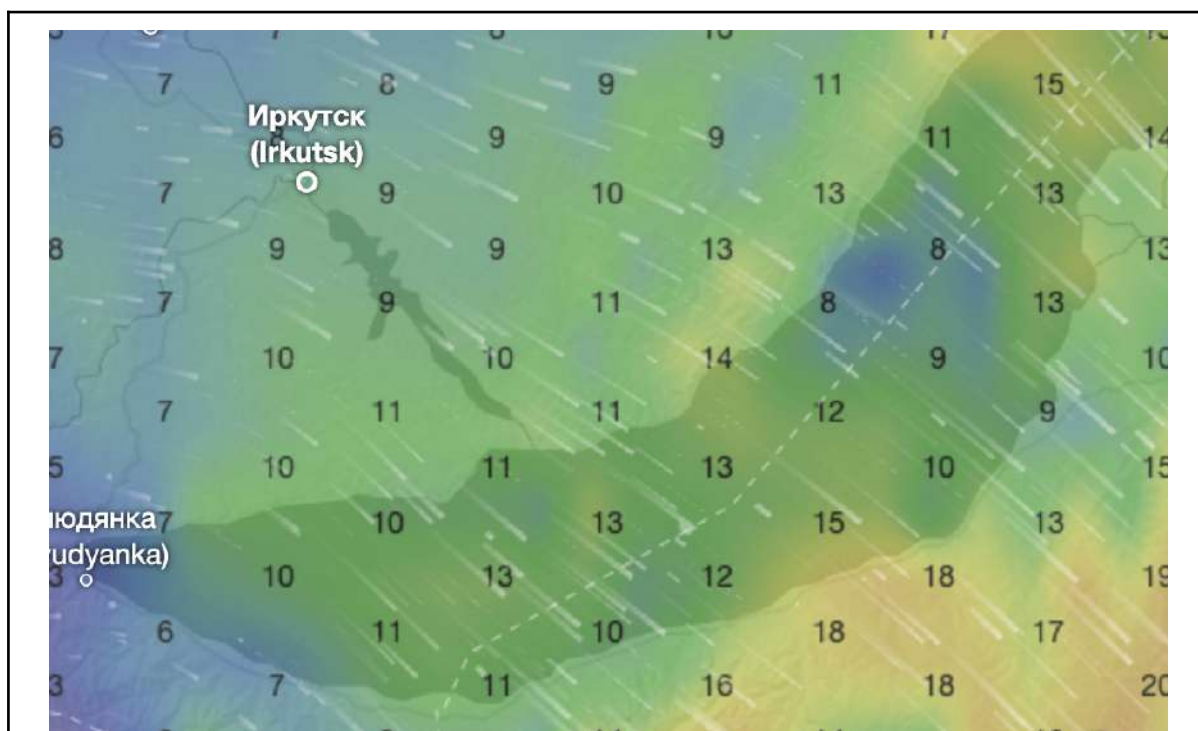
Карта распределения скорости ветра(м/с)



Спутниковый снимок Sentinel-1

Рисунок А.10 - Бора на озере Байкал. 17.11.2021 23:00 UTC

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



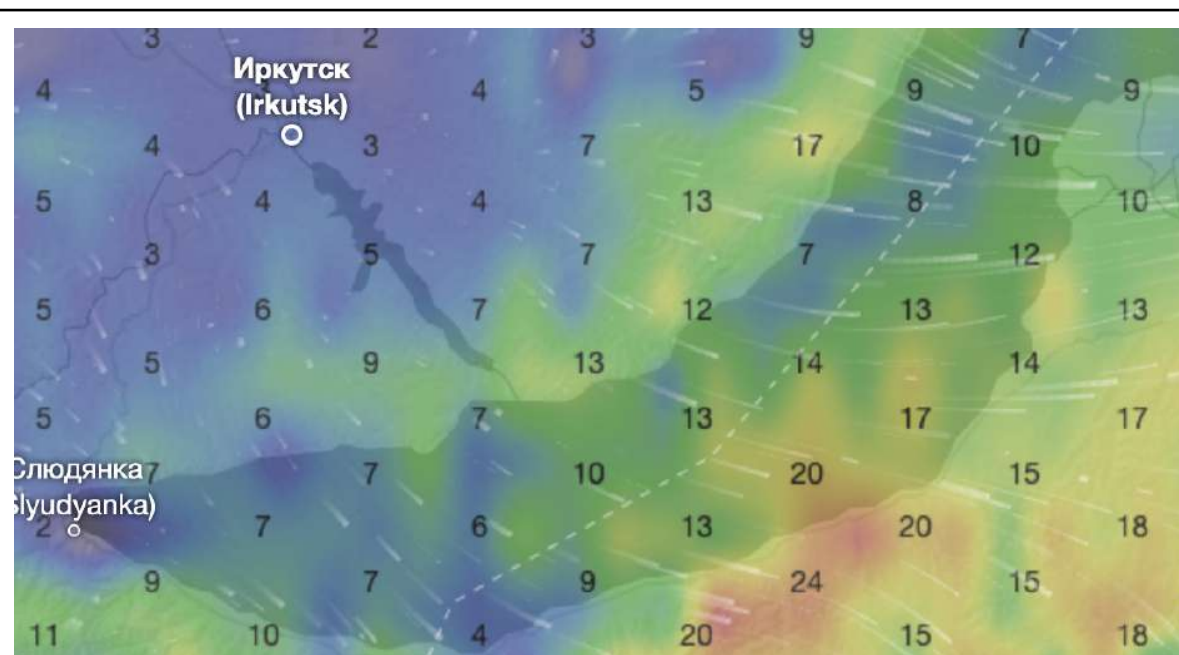
Карта распределения скорости ветра(м/с)



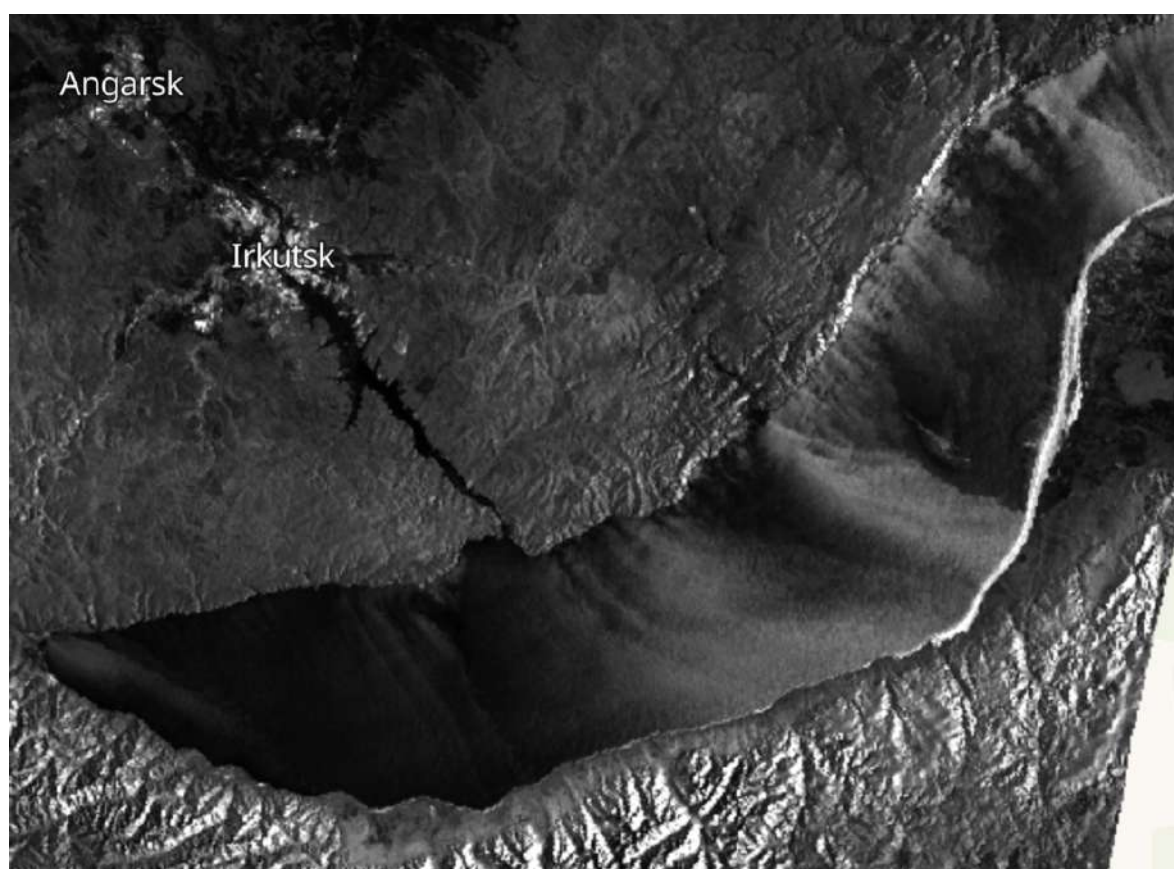
Спутниковый снимок Sentinel-1

Рисунок А.10 - Бора на озере Байкал. 17.11.2021 23:00 UTC

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



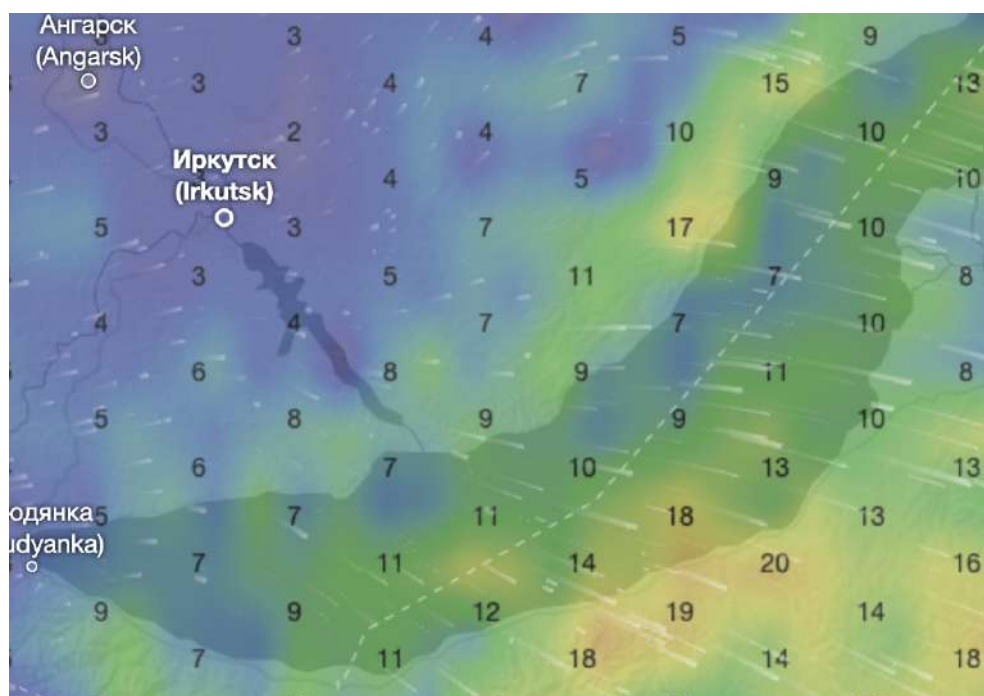
Карта распределения скорости ветра(м/с)



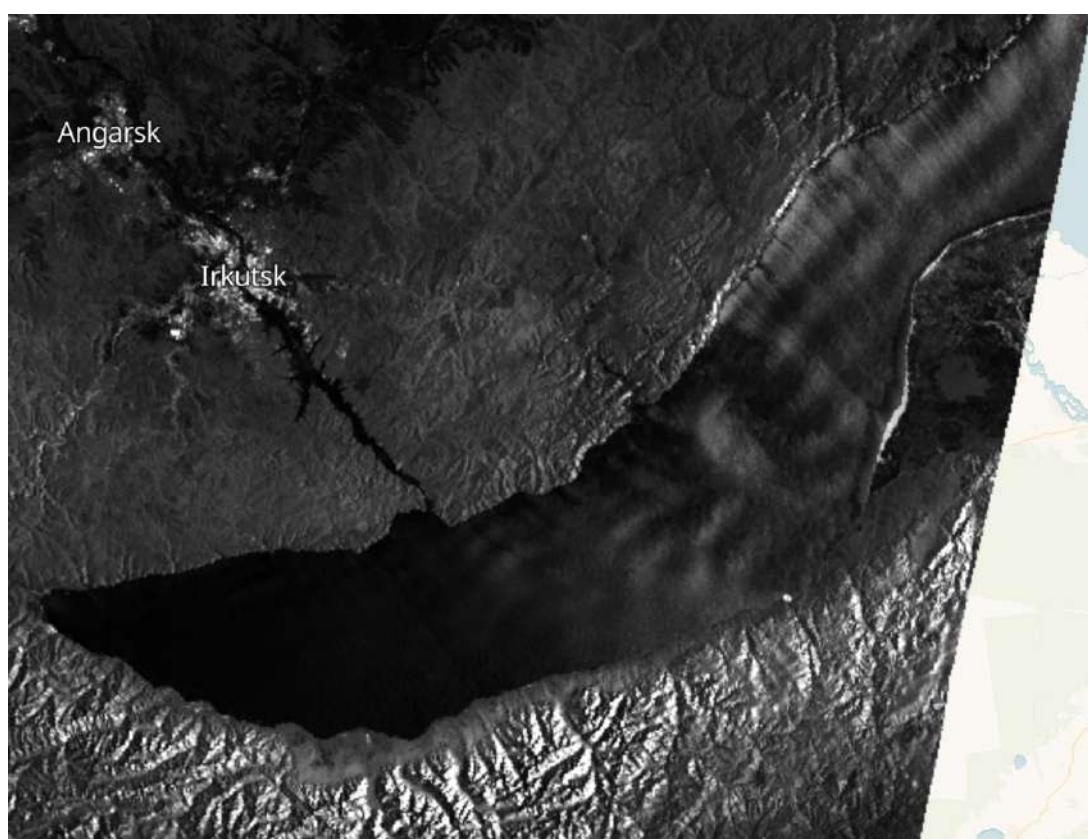
Спутниковый снимок Sentinel-1

Рисунок А.11 - Бора на озере Байкал. 28.12.2020 23:00 UTC

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



Карта распределения скорости ветра(м/с)



Спутниковый снимок Sentinel-1

Рисунок А.12 - Бора на озере Байкал. 16.12.2020 23:00 UTC

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

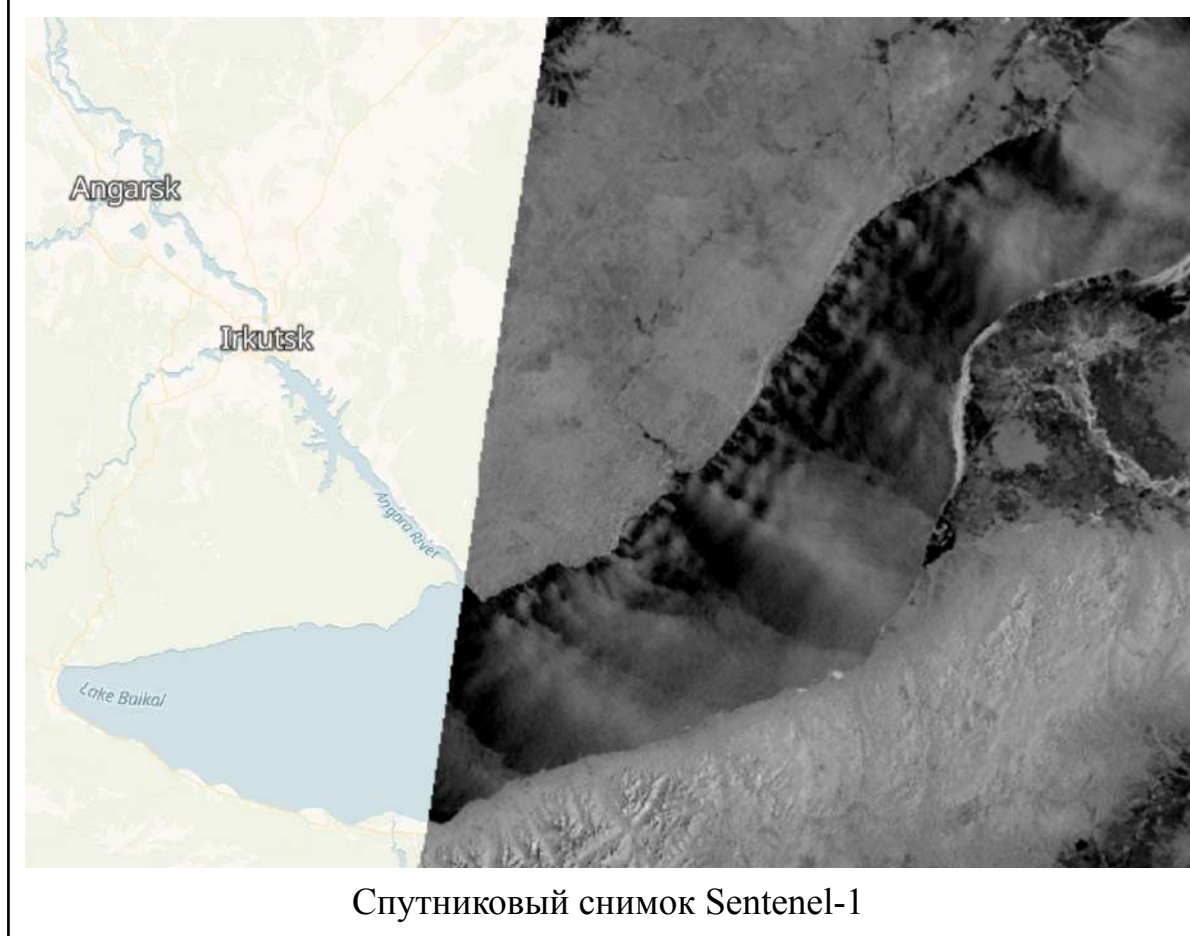
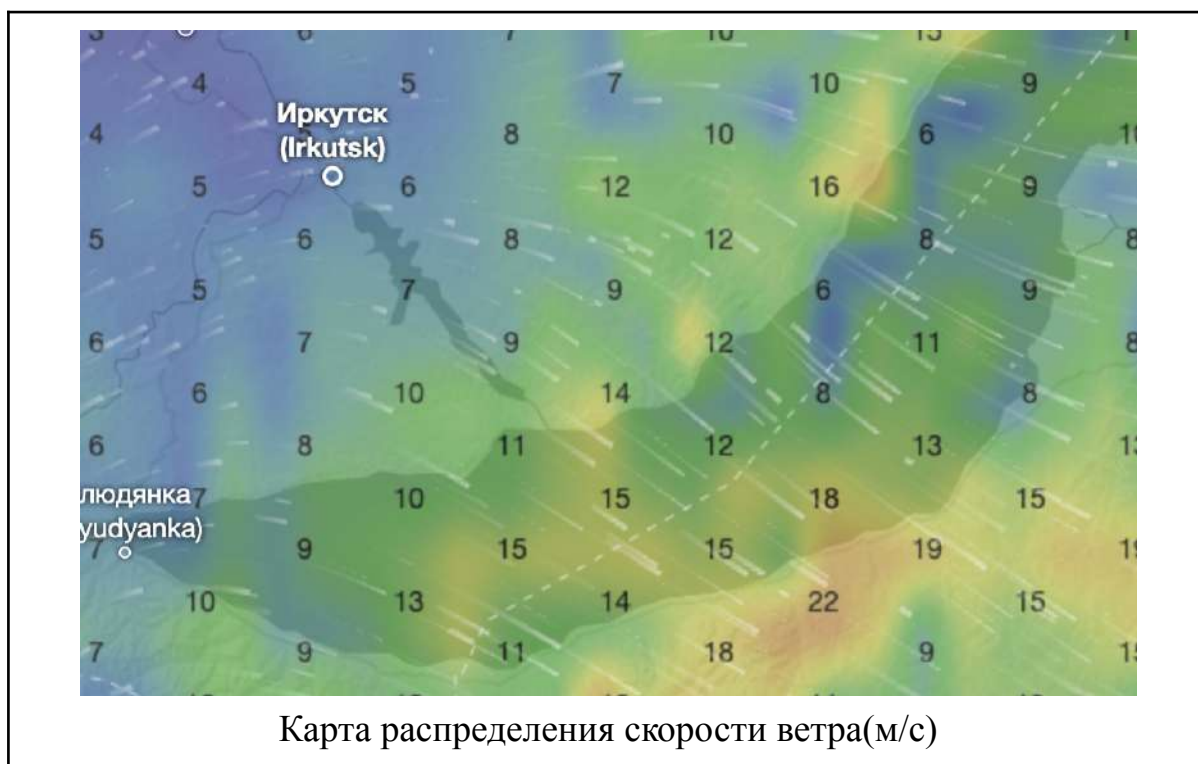


Рисунок А.13 - Бора на озере Байкал. 29.11.2022 23:00 UTC

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

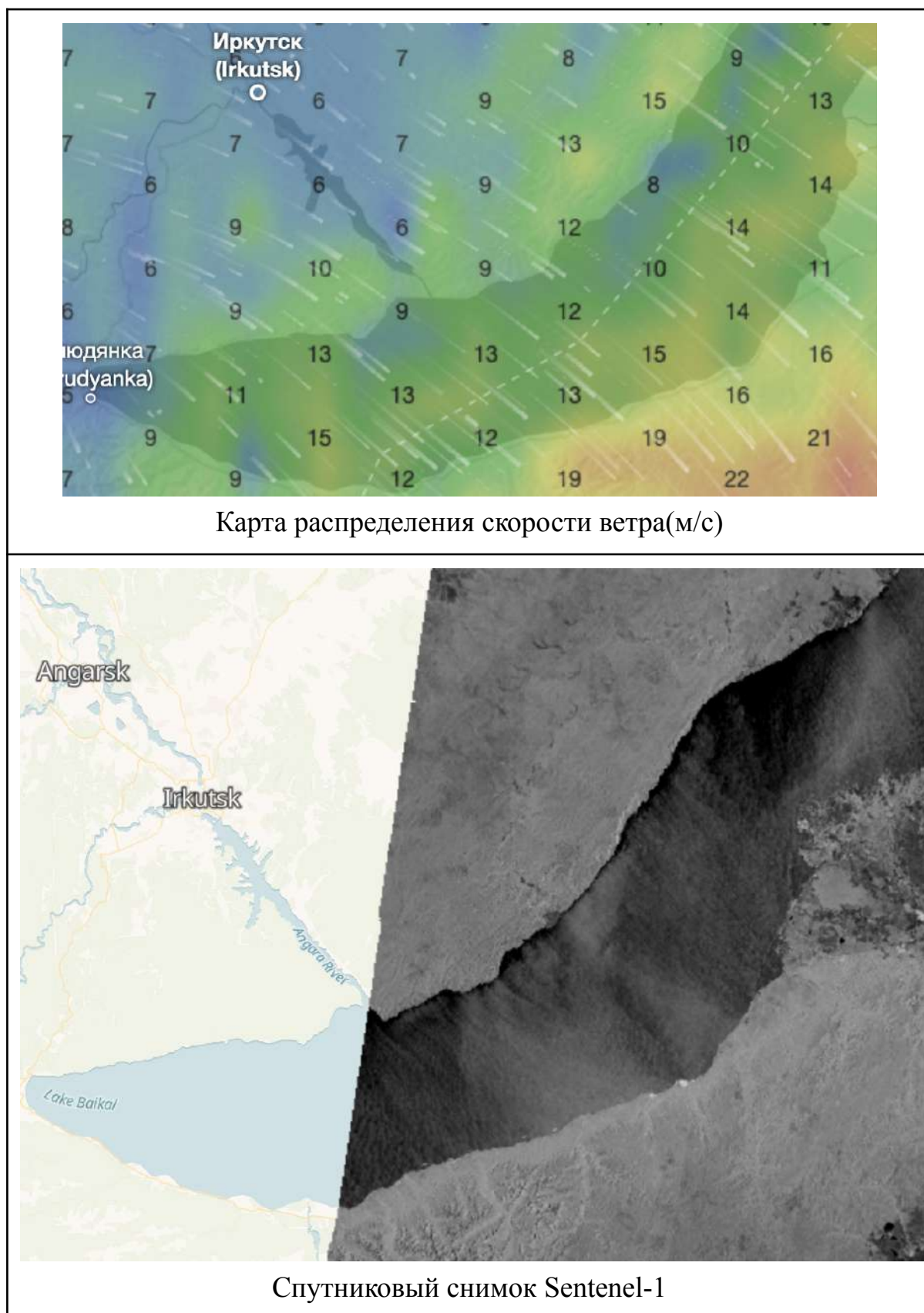


Рисунок А.14 - Бора на озере Байкал. 30.09.2020 23:00 UTC

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

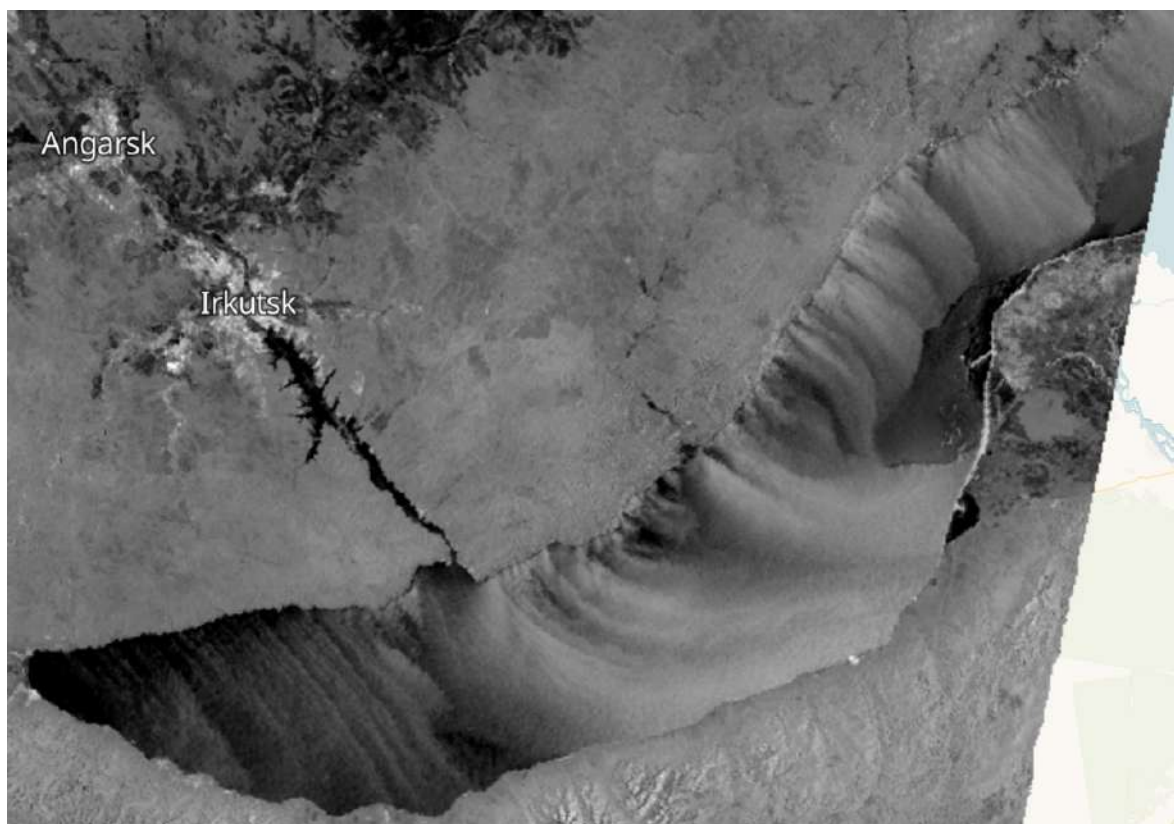
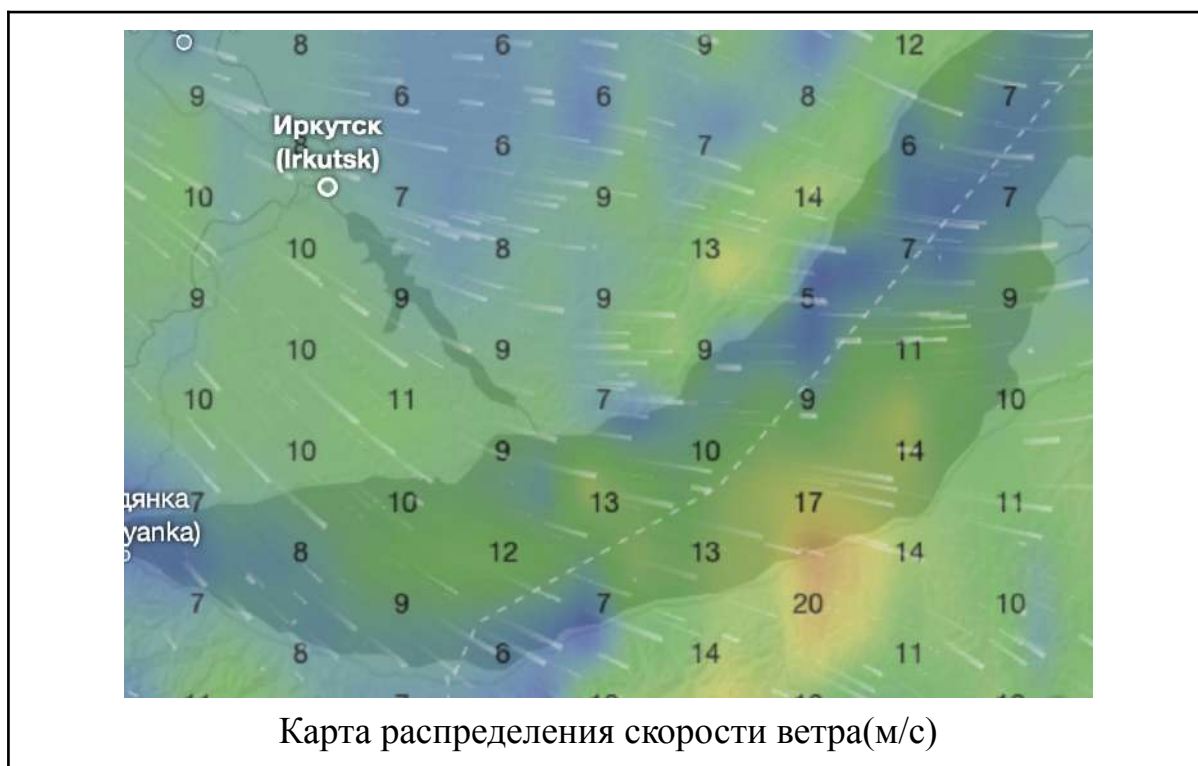
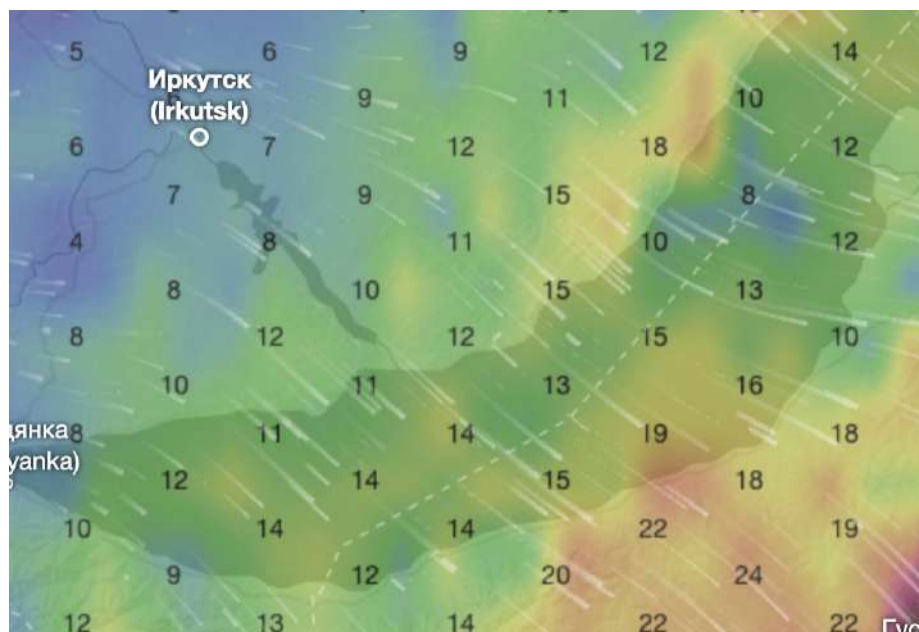
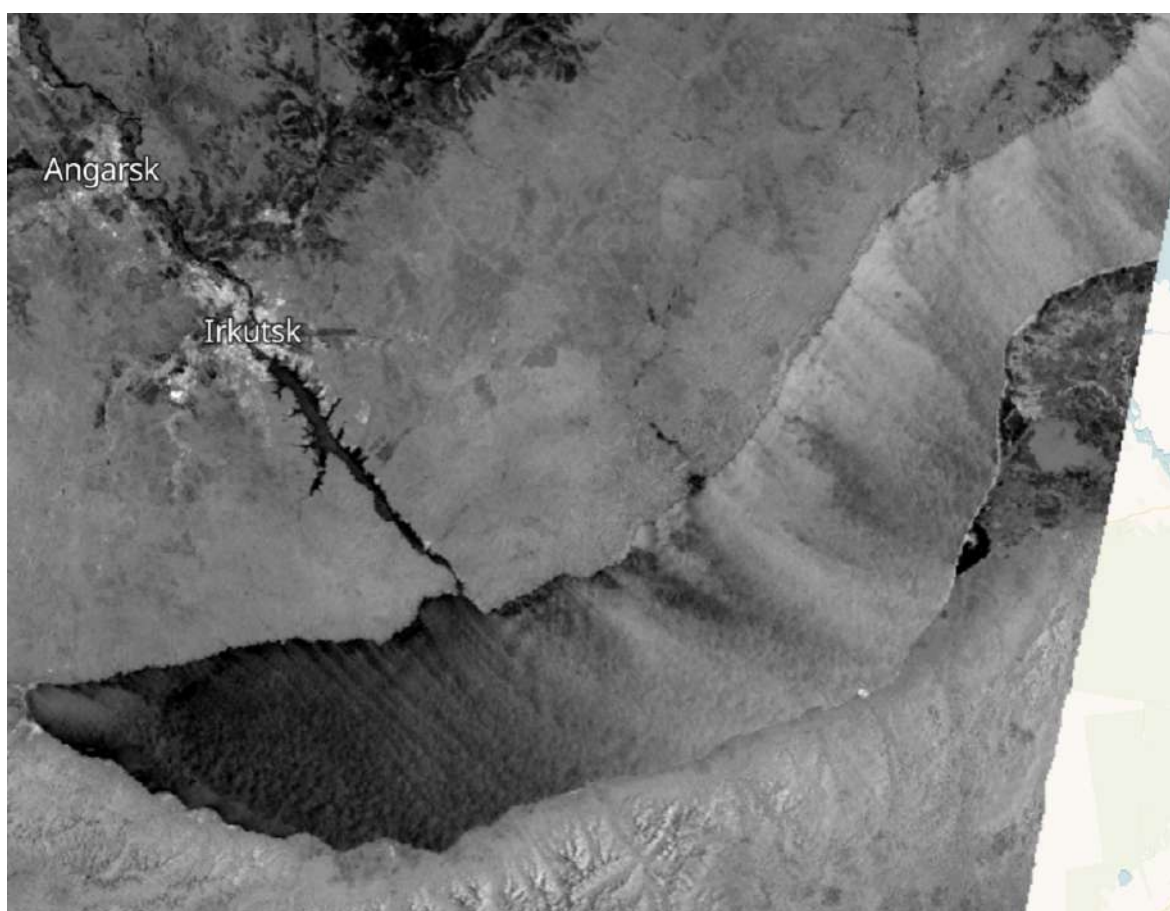


Рисунок А.15 - Бора на озере Байкал. 28.11.2019 23:00 UTC

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



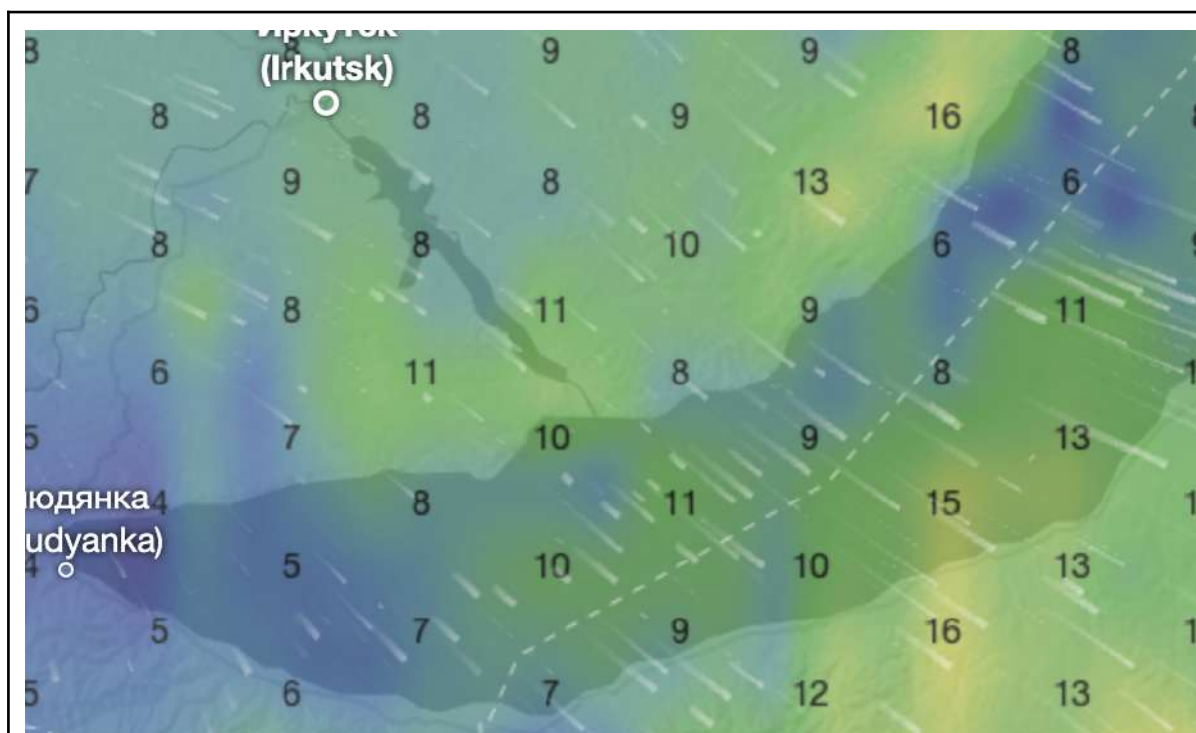
Карта распределения скорости ветра(м/с)



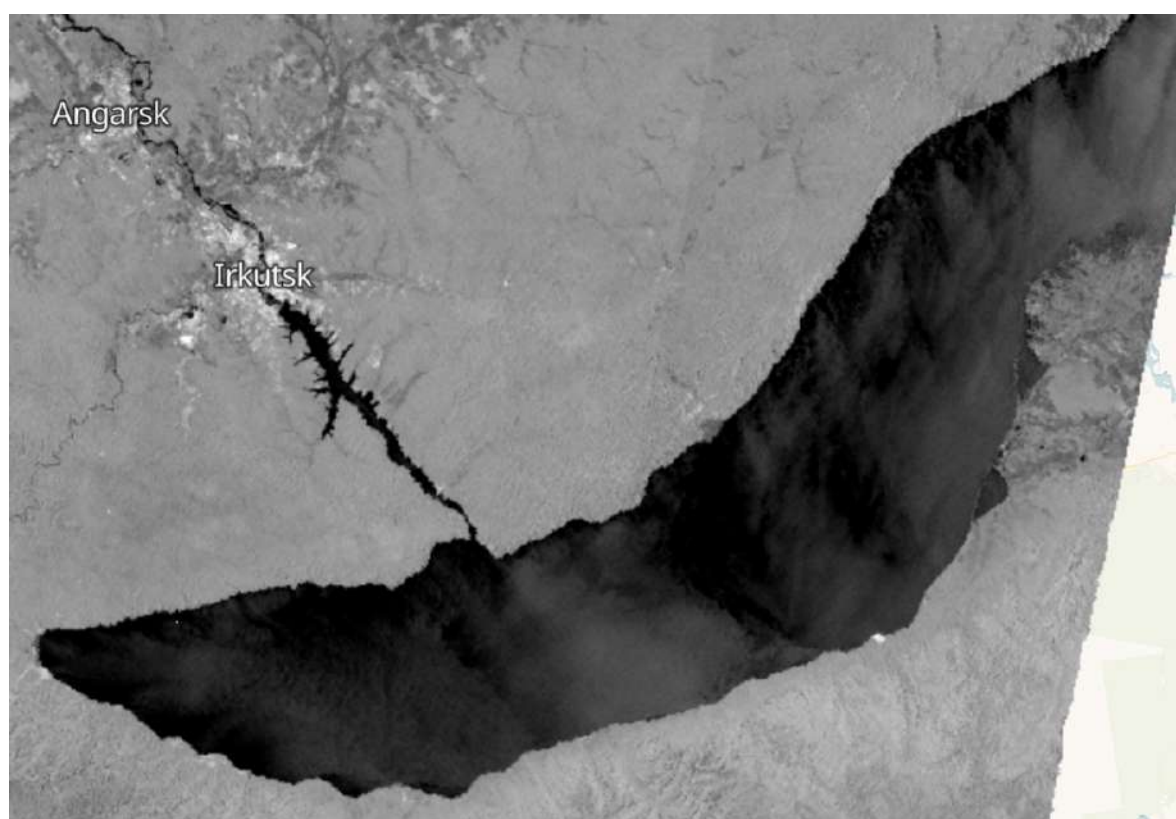
Спутниковый снимок Sentinel-1

Рисунок А.16 - Бора на озере Байкал. 16.11.2019 23:00 UTC

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



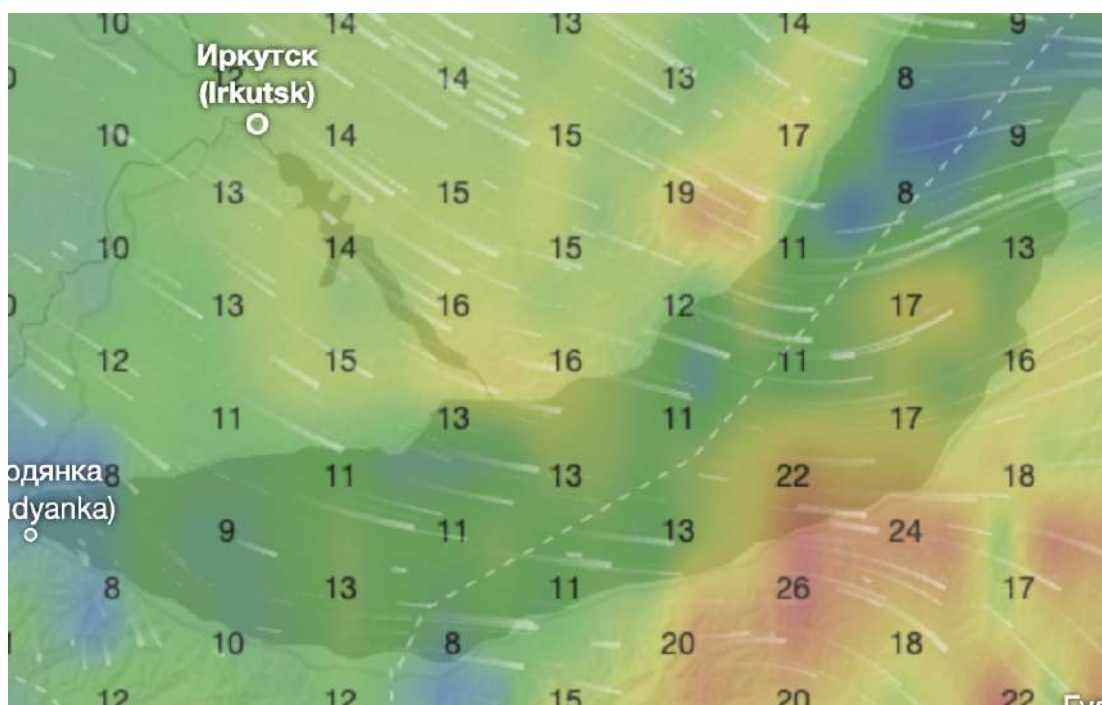
Карта распределения скорости ветра(м/с)



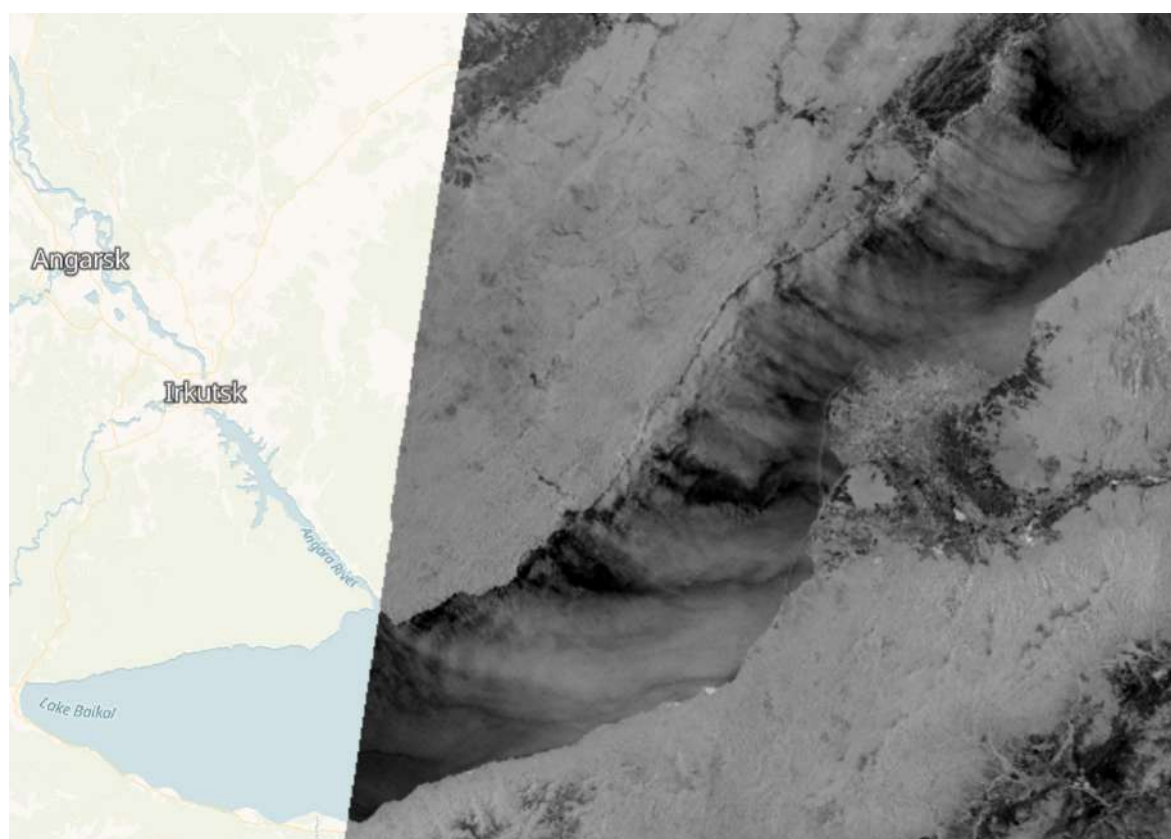
Спутниковый снимок Sentinel-1

Рисунок А.17 - Бора на озере Байкал. 05.09.2019 23:00 UTC

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



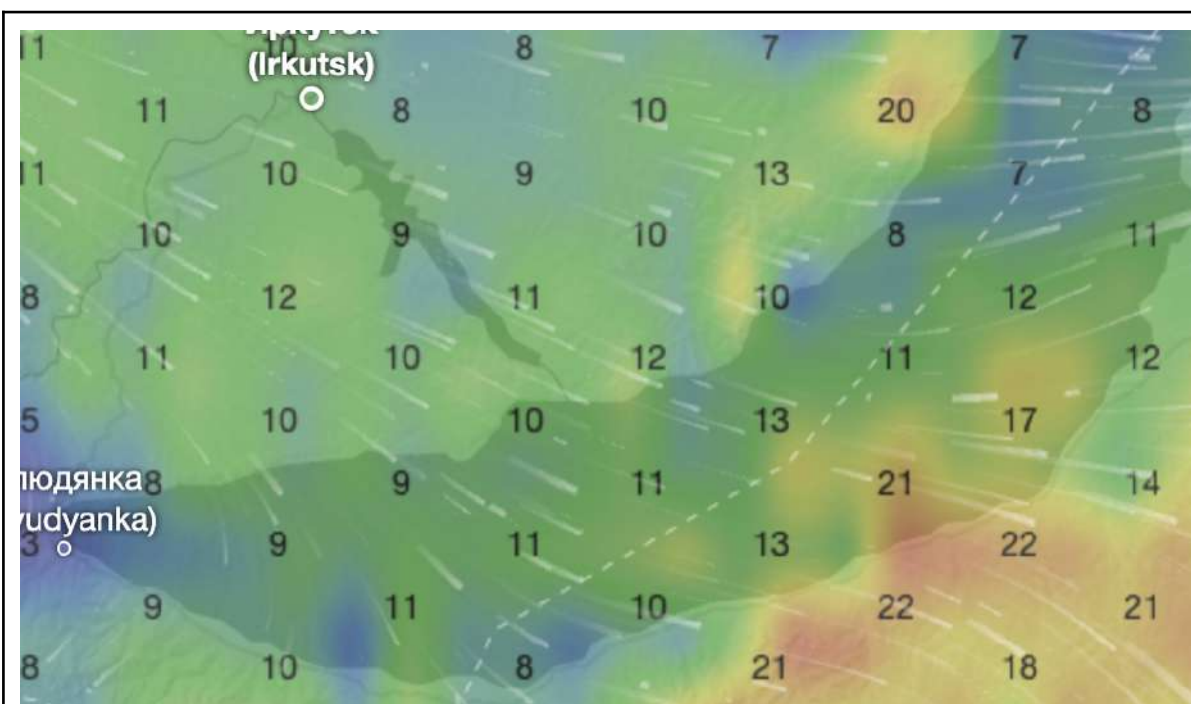
Карта распределения скорости ветра(м/с)



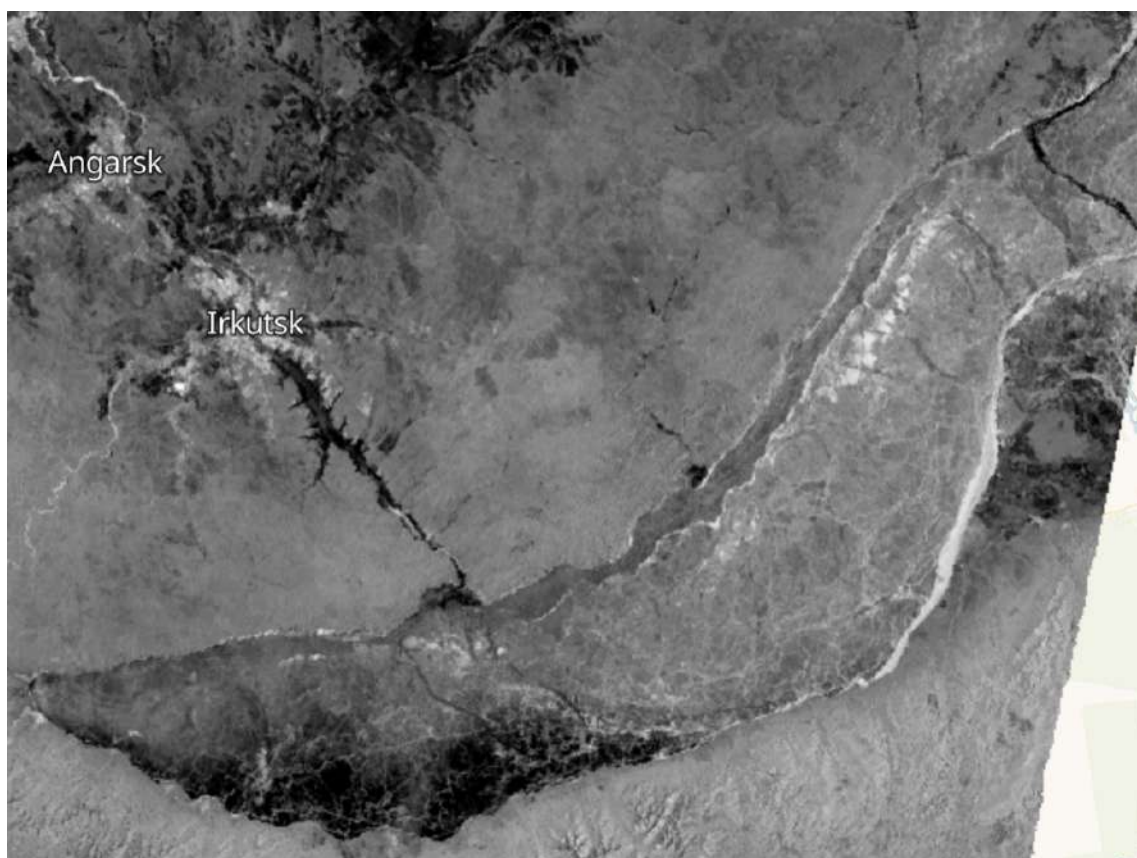
Спутниковый снимок Sentinel-1

Рисунок А.18 - Бора на озере Байкал. 27.05.2019 23:00 UTC

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



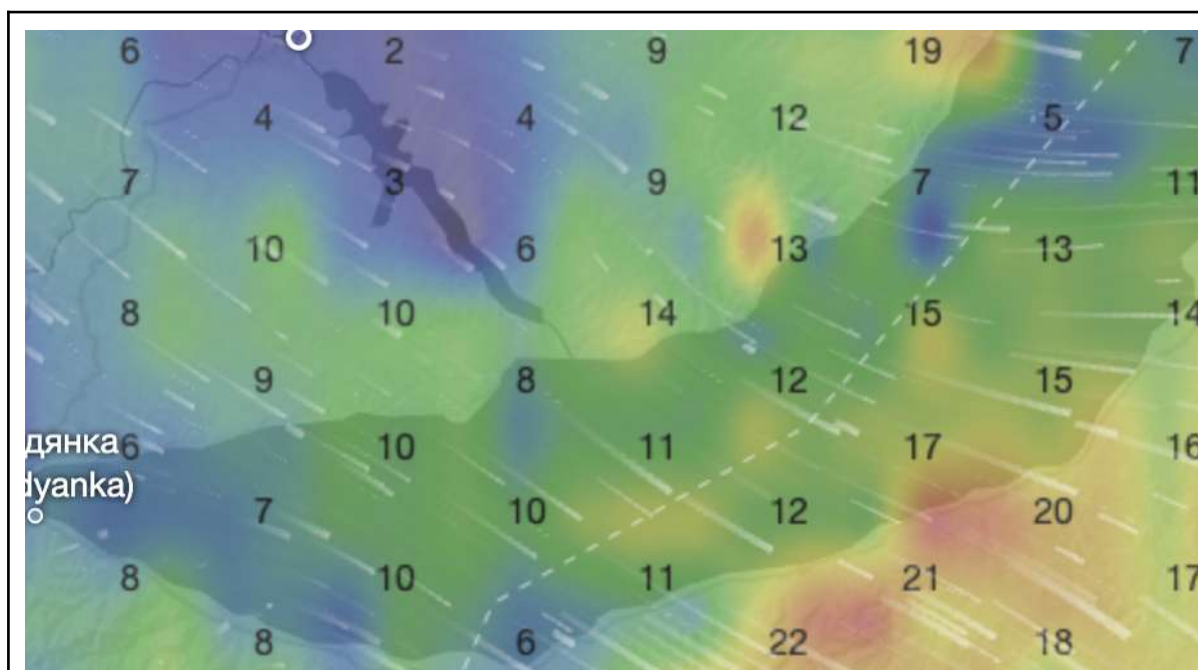
Карта распределения скорости ветра(м/с)



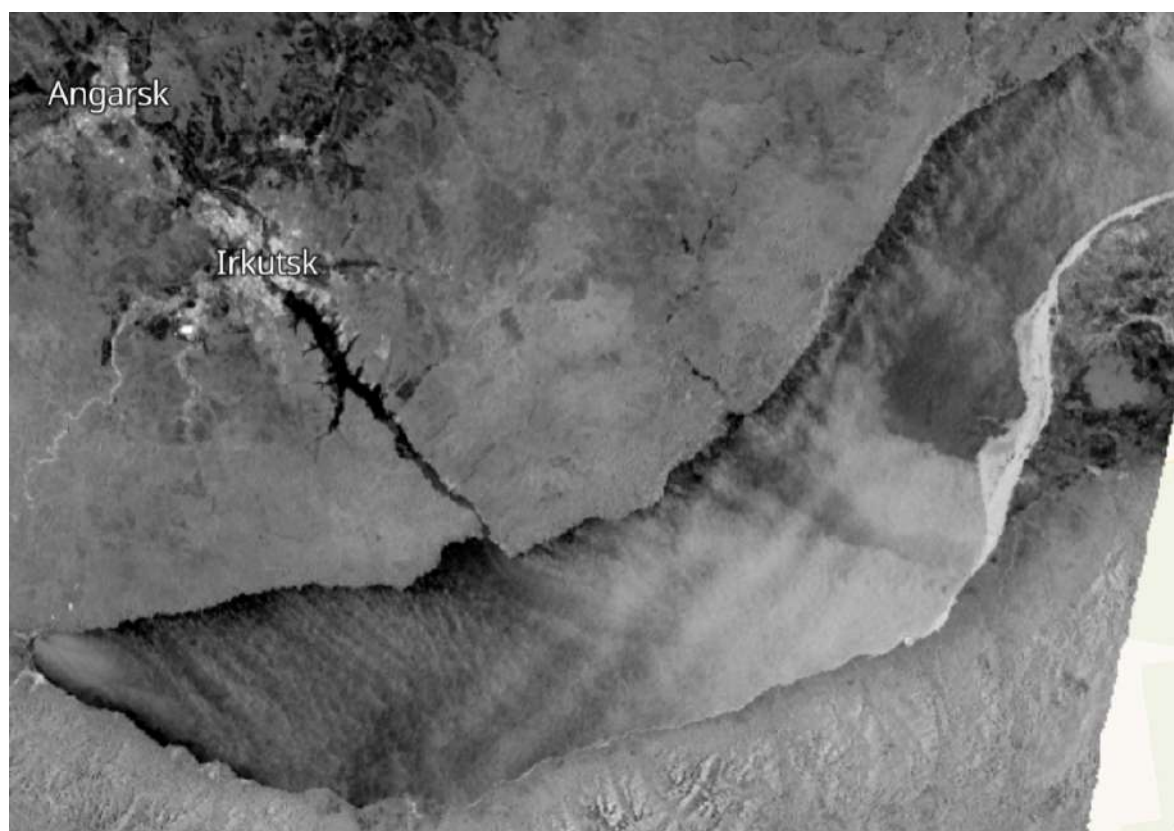
Спутниковый снимок Sentinel-1

Рисунок А.19 - Бора на озере Байкал. 01.02.2019 23:00 UTC

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



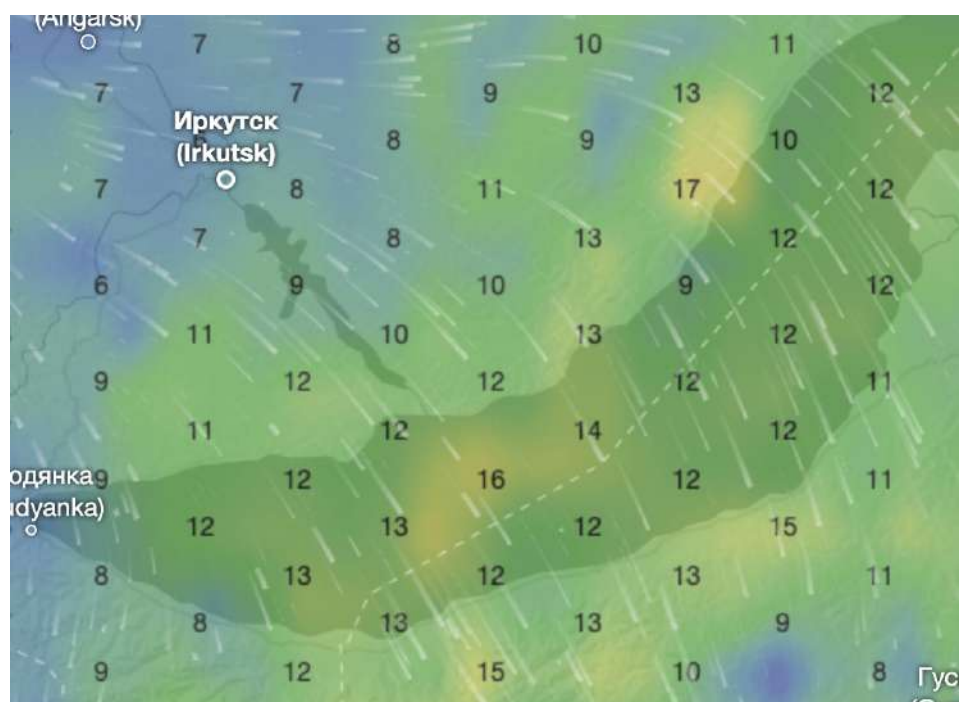
Карта распределения скорости ветра(м/с)



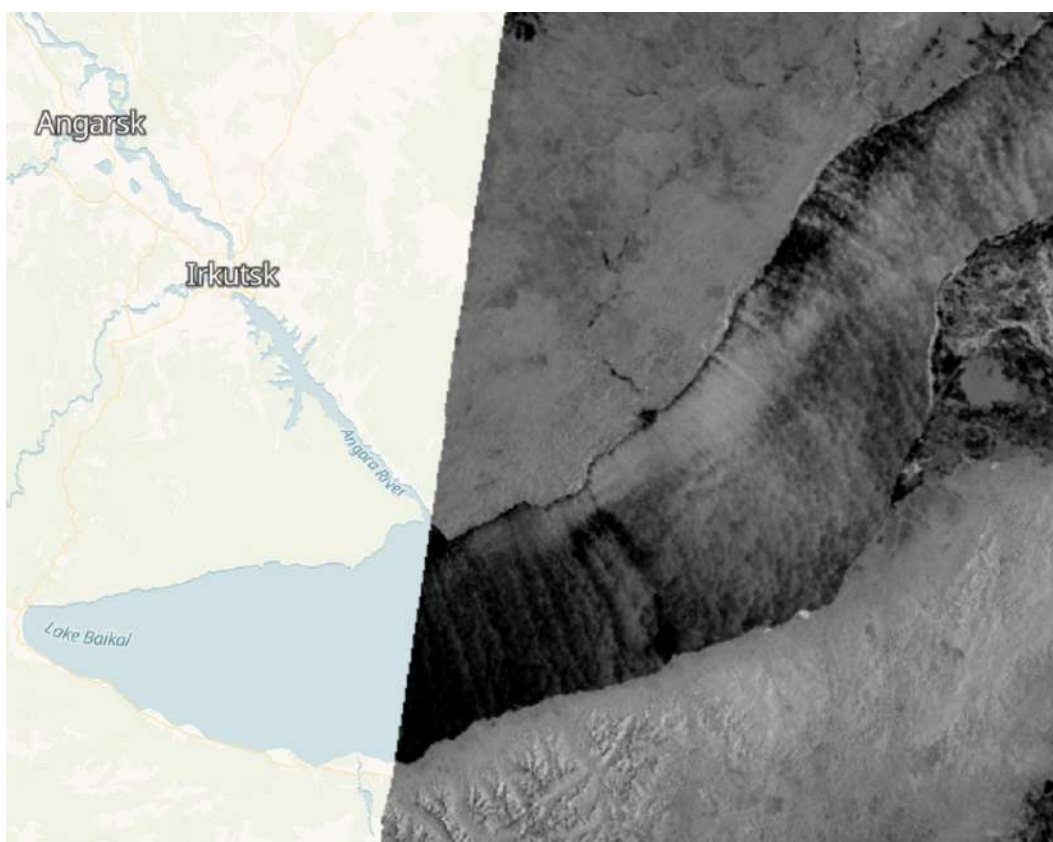
Спутниковый снимок Sentinel-1

Рисунок А.20 - Бора на озере Байкал. 27.12.2018 23:00 UTC

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



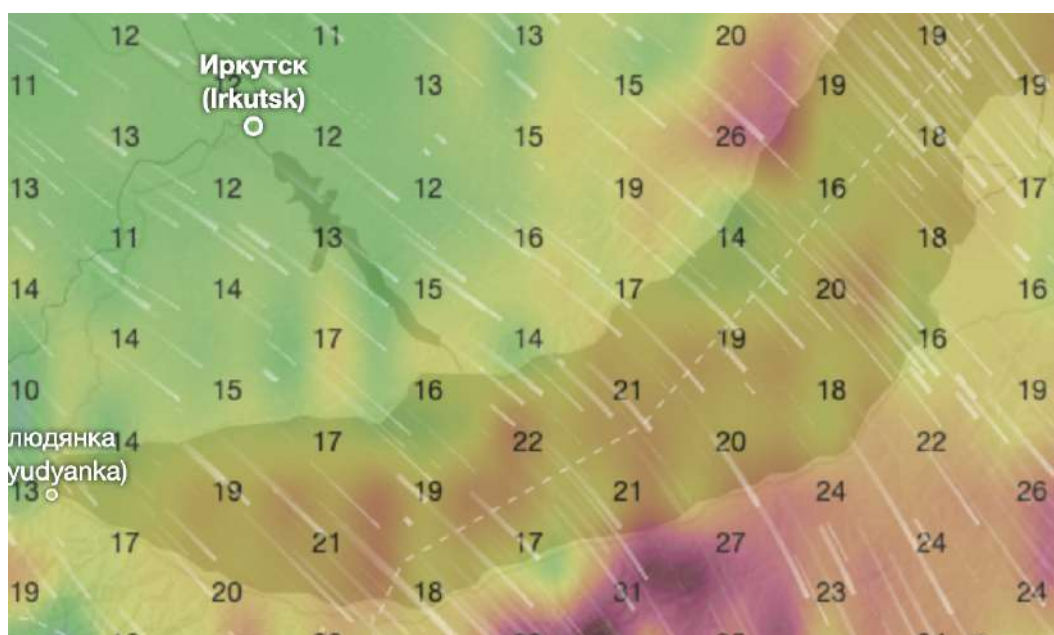
Карта распределения скорости ветра(м/с)



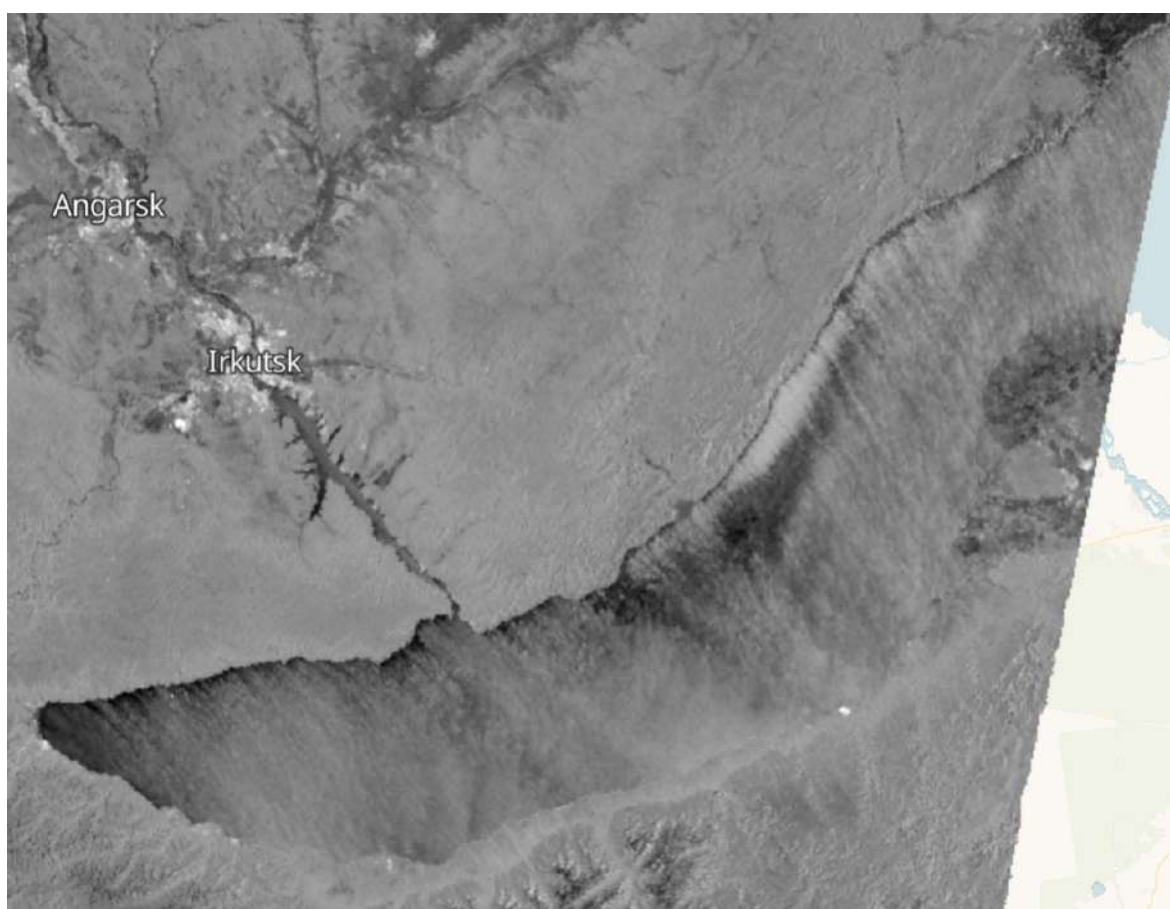
Спутниковый снимок Sentinel-1

Рисунок А.21 - Бора на озере Байкал. 16.12.2018 23:00 UTC

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



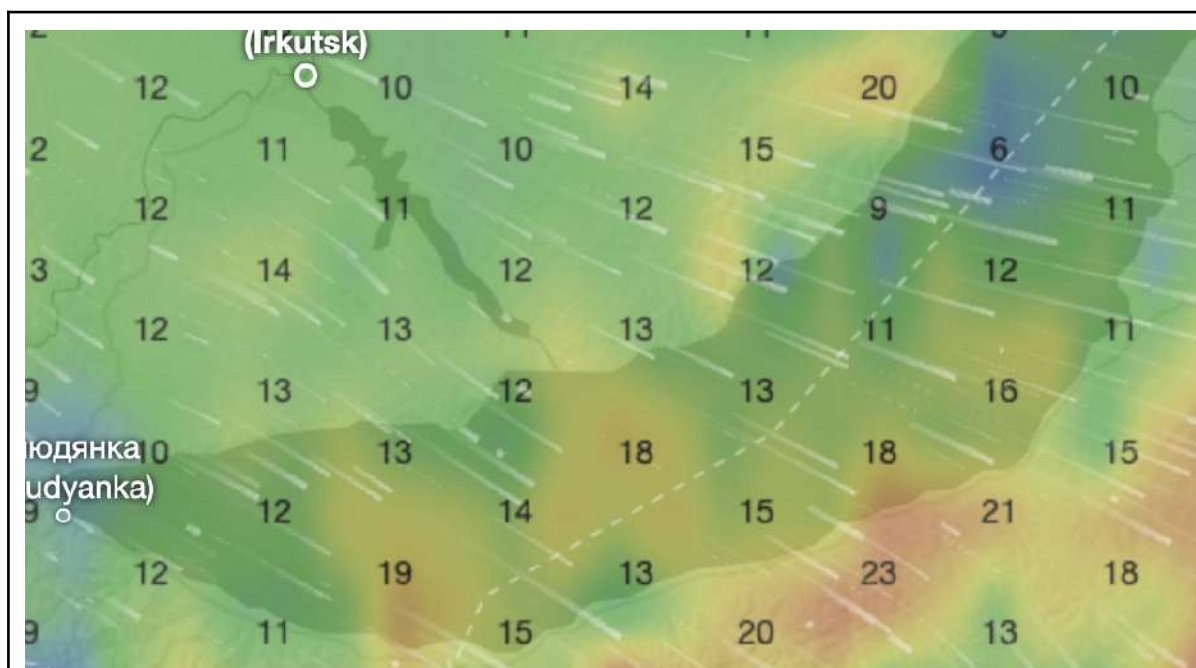
Карта распределения скорости ветра(м/с)



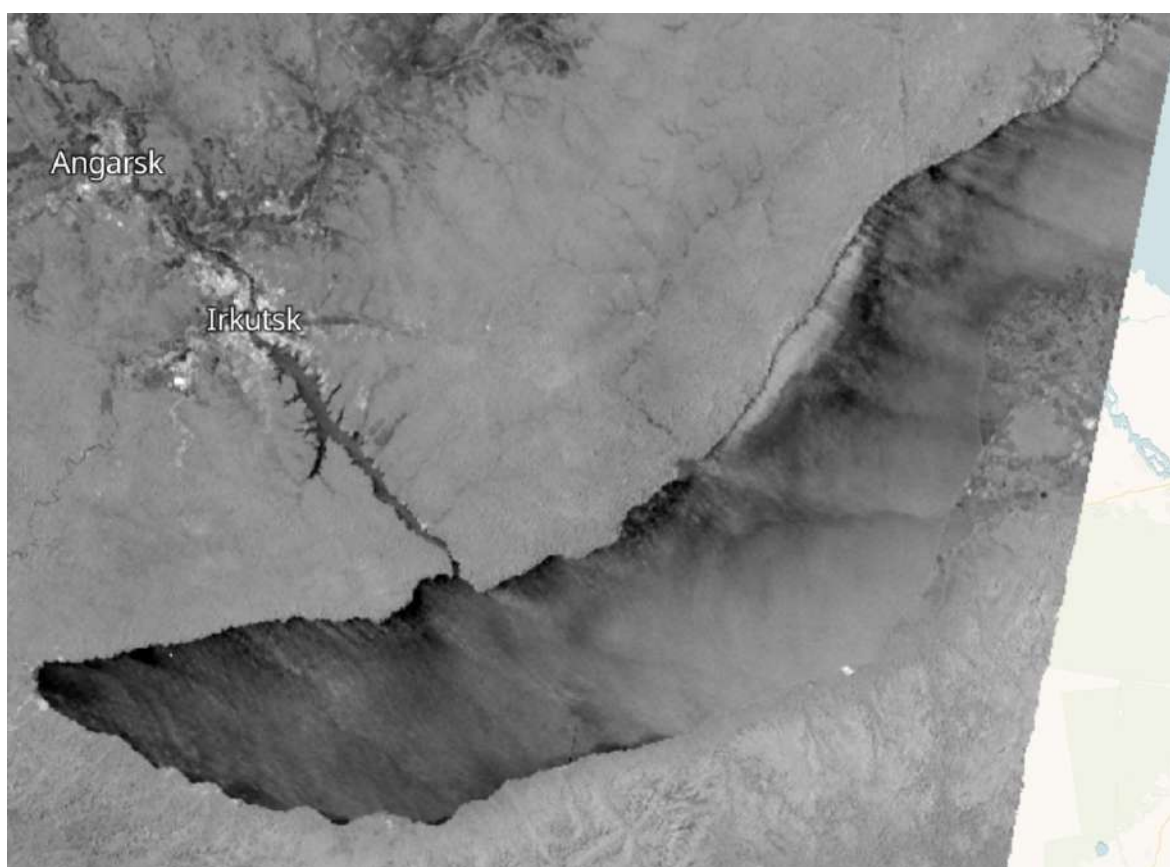
Спутниковый снимок Sentinel-1

Рисунок А.22 - Бора на озере Байкал. 04.10.2018 23:00 UTC

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



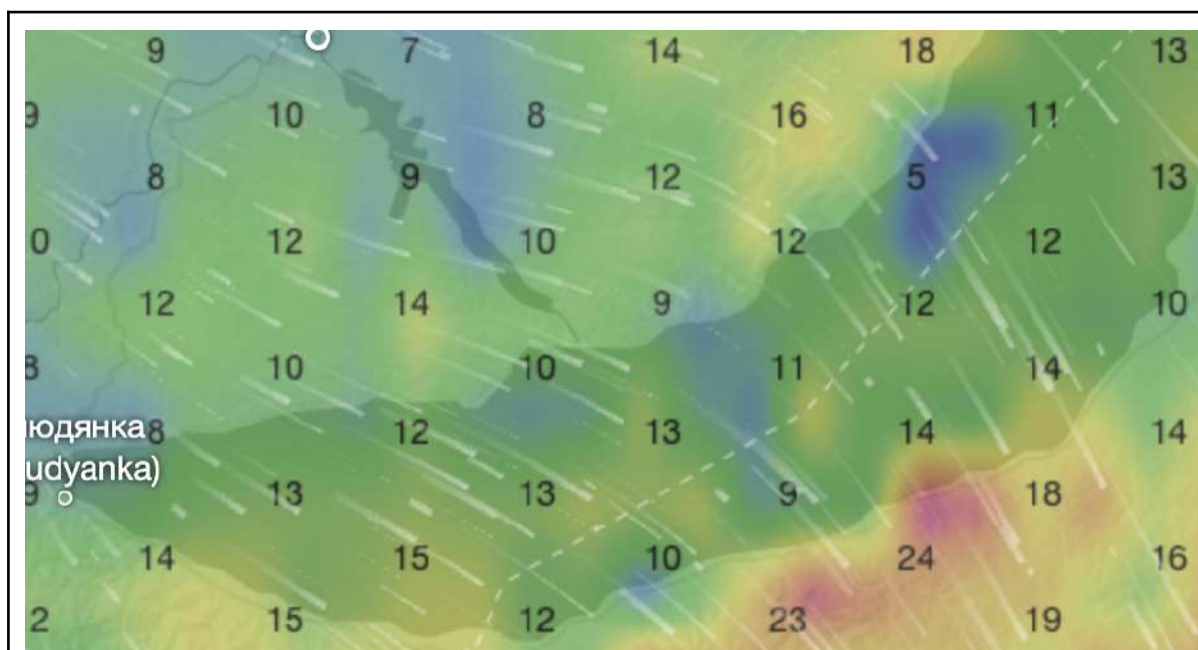
Карта распределения скорости ветра(м/с)



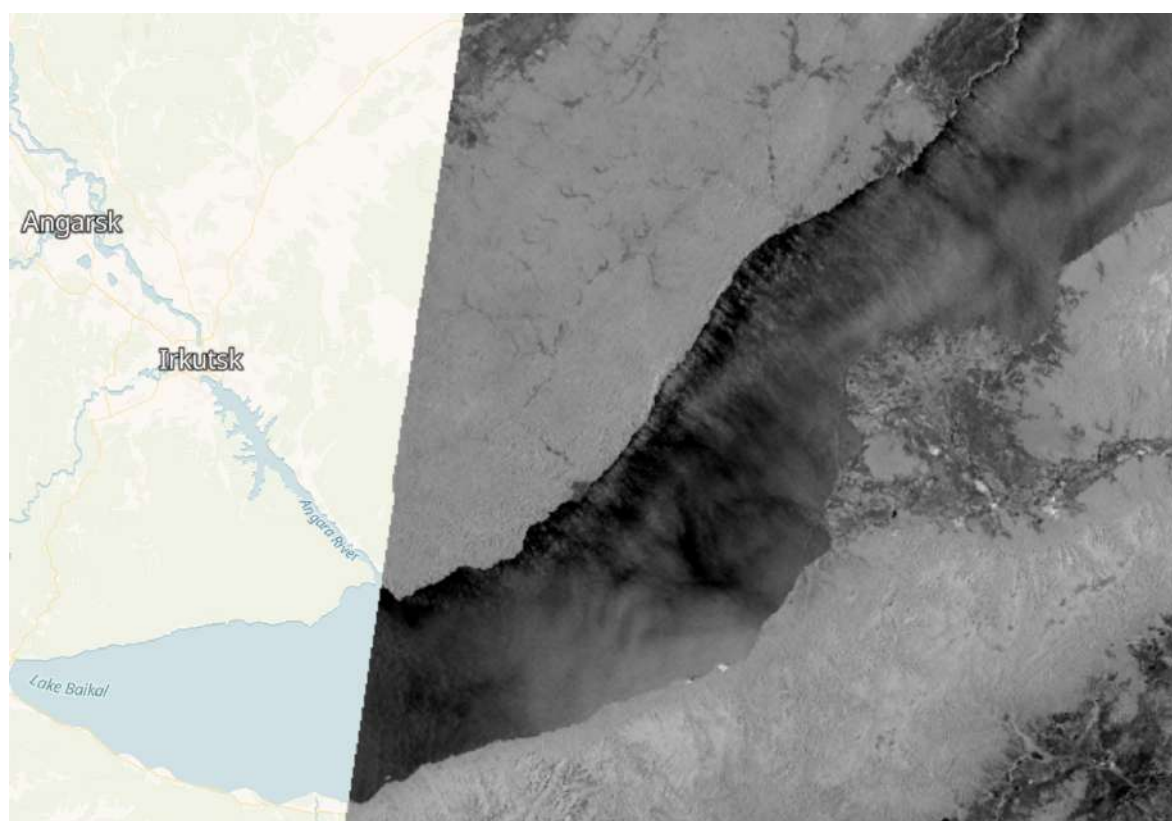
Спутниковый снимок Sentinel-1

Рисунок А.23 - Бора на озере Байкал. 10.09.2018 23:00 UTC

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



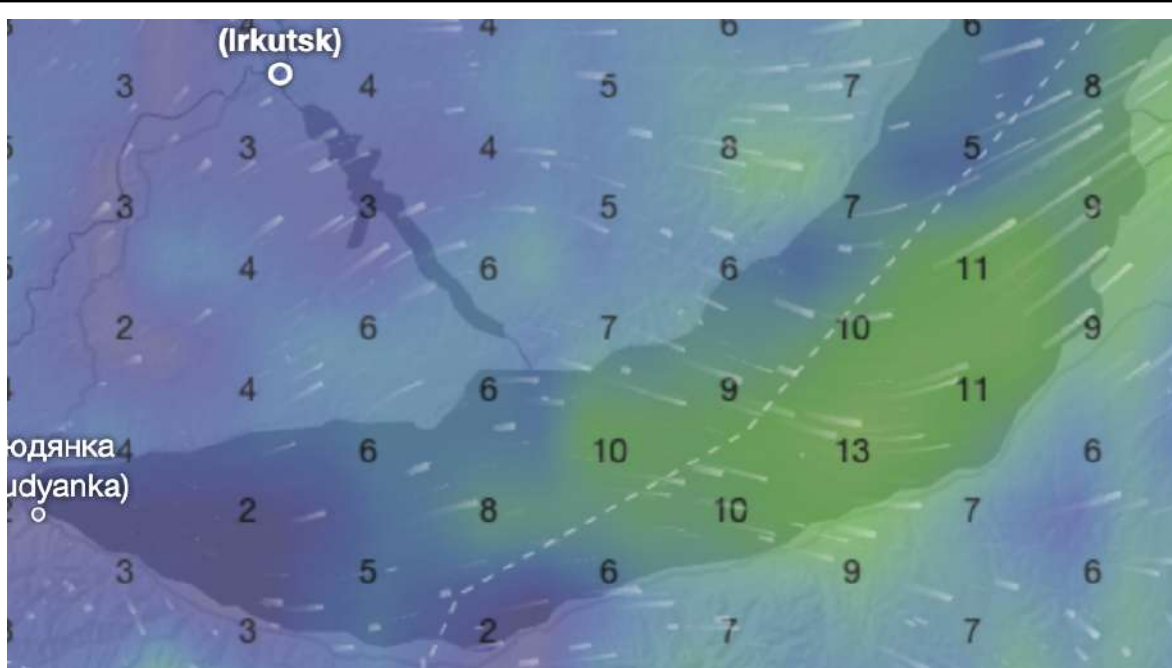
Карта распределения скорости ветра(м/с)



Спутниковый снимок Sentinel-1

Рисунок А.24 - Бора на озере Байкал. 06.09.2018 23:00 UTC

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



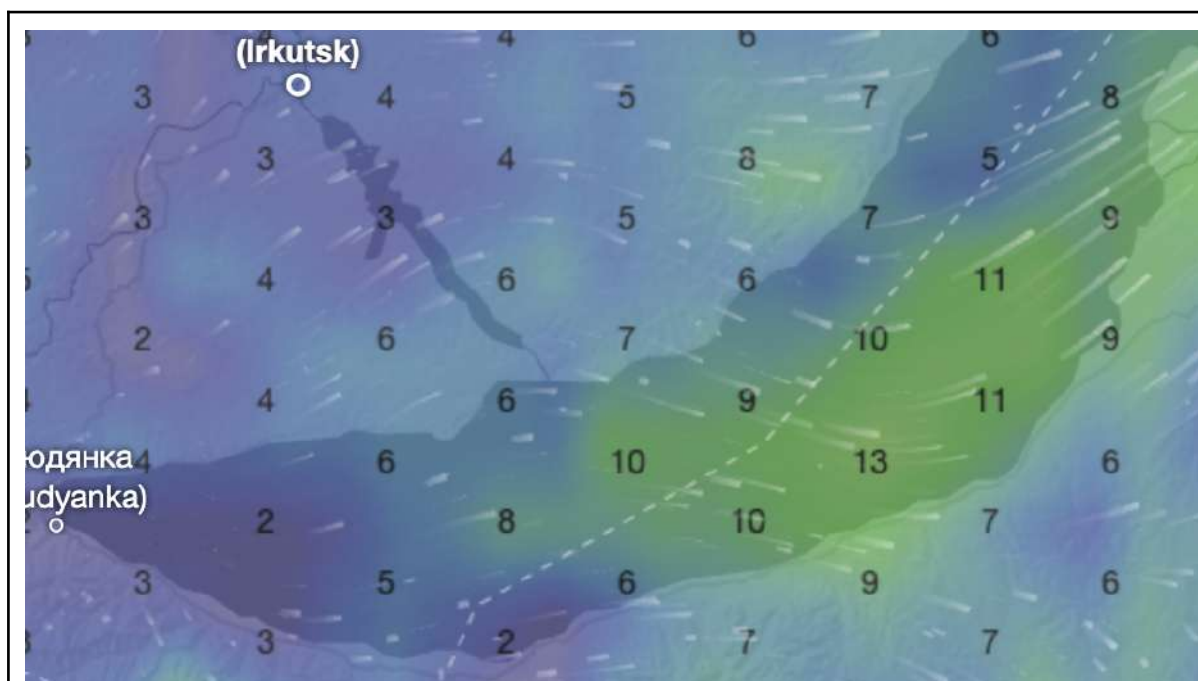
Карта распределения скорости ветра(м/с)



Спутниковый снимок Sentinel-1

Рисунок А.25 - Бора на озере Байкал. 29.08.2018 23:00 UTC

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



Карта распределения скорости ветра(м/с)



Спутниковый снимок Sentinel-1

Рисунок А.25 - Бора на озере Байкал. 29.08.2018 23:00 UTC

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

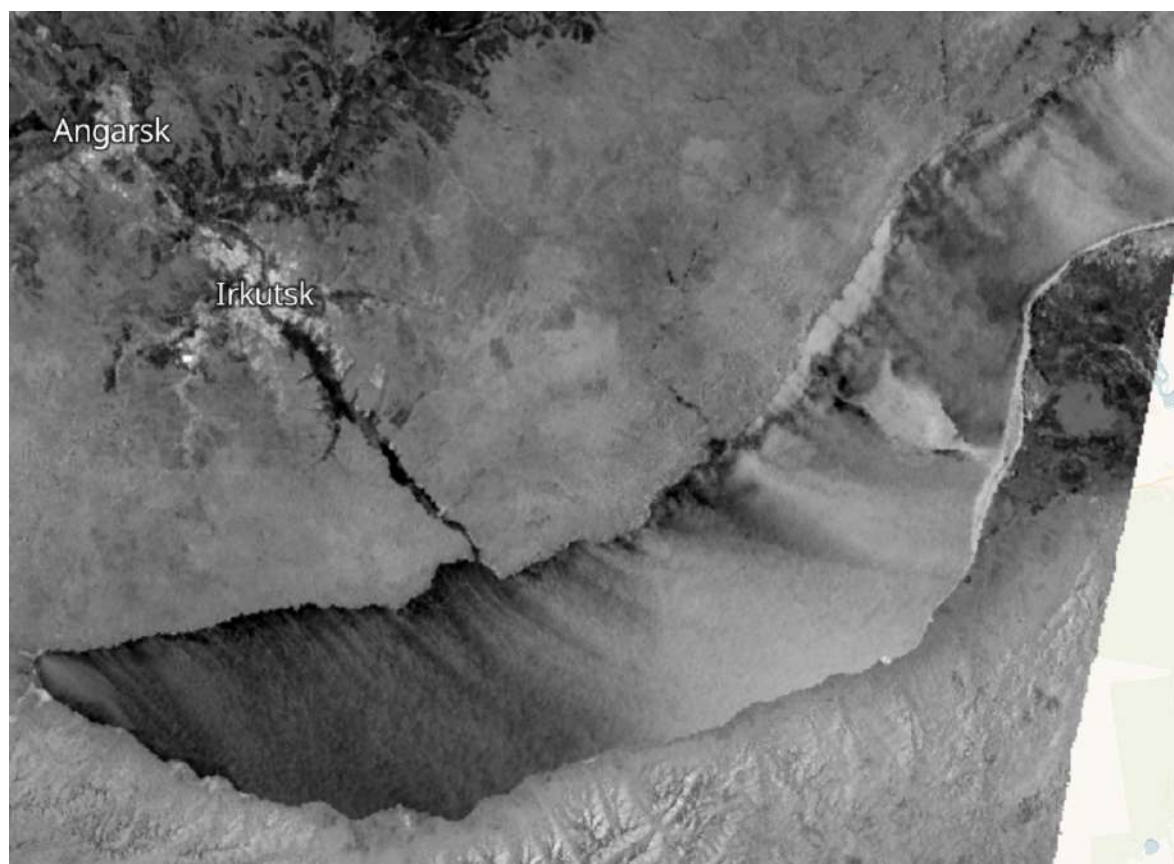
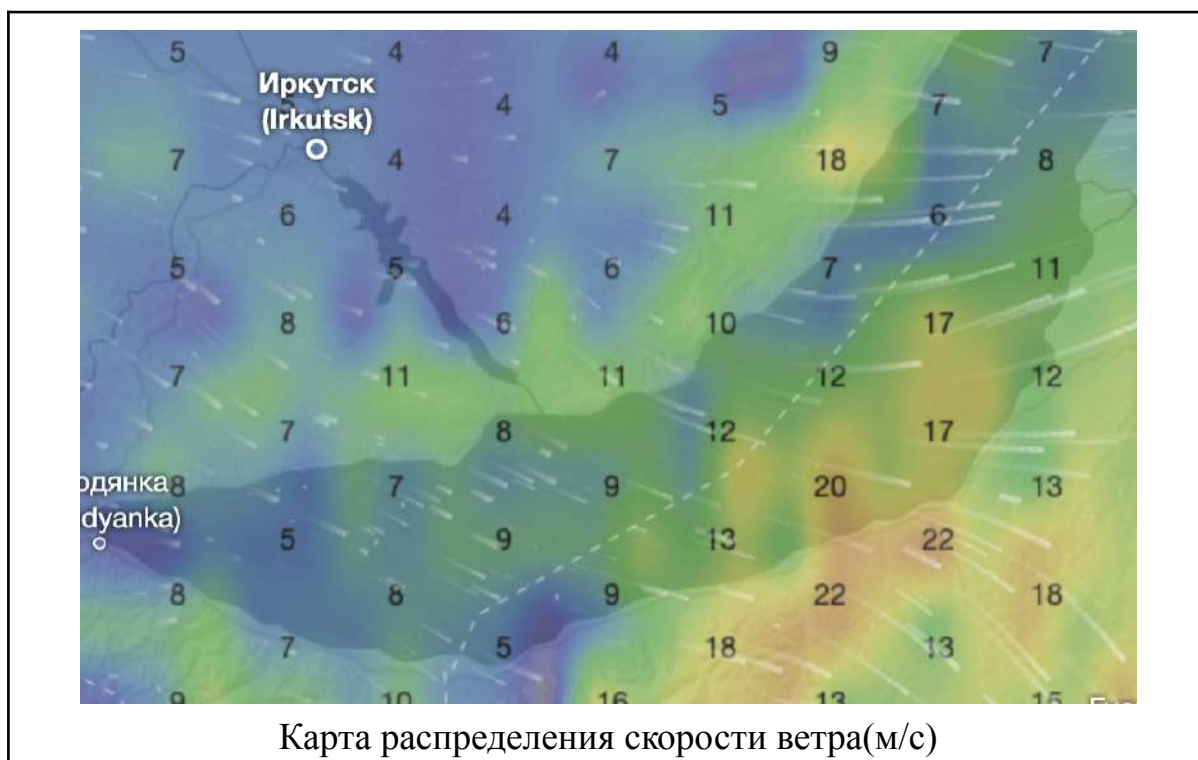
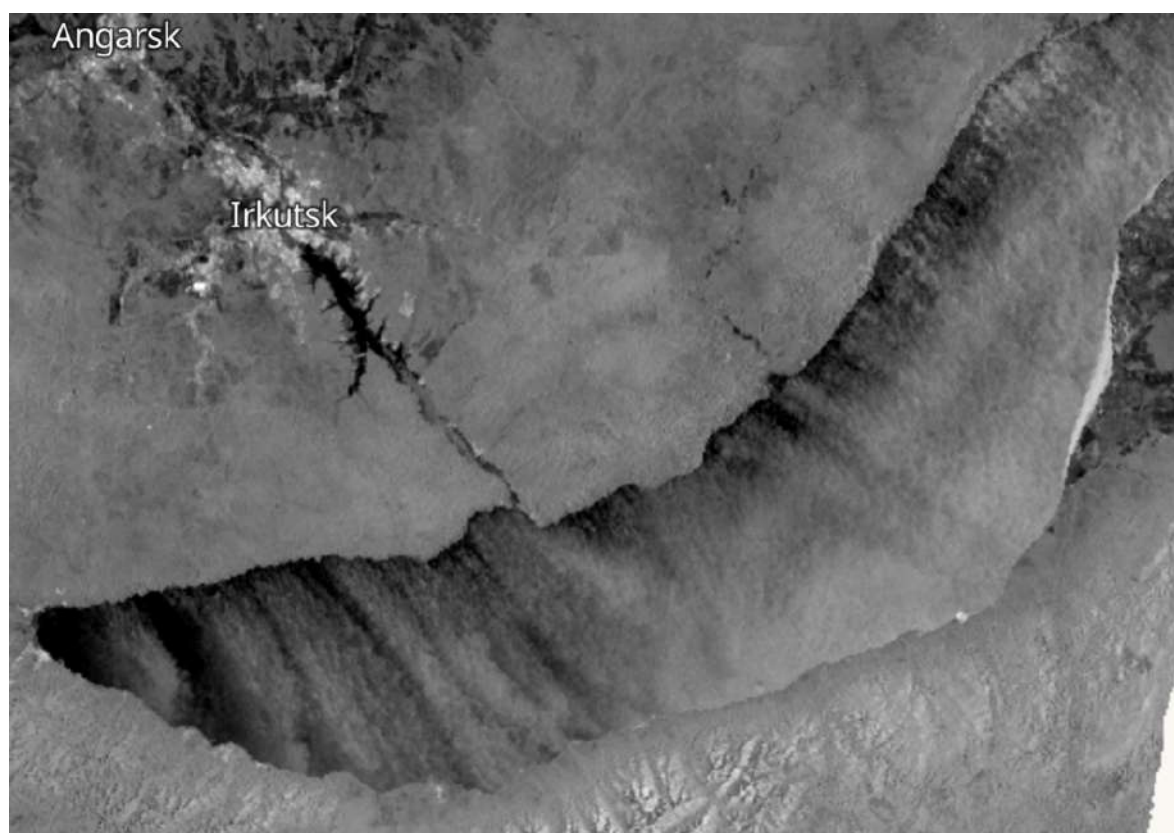
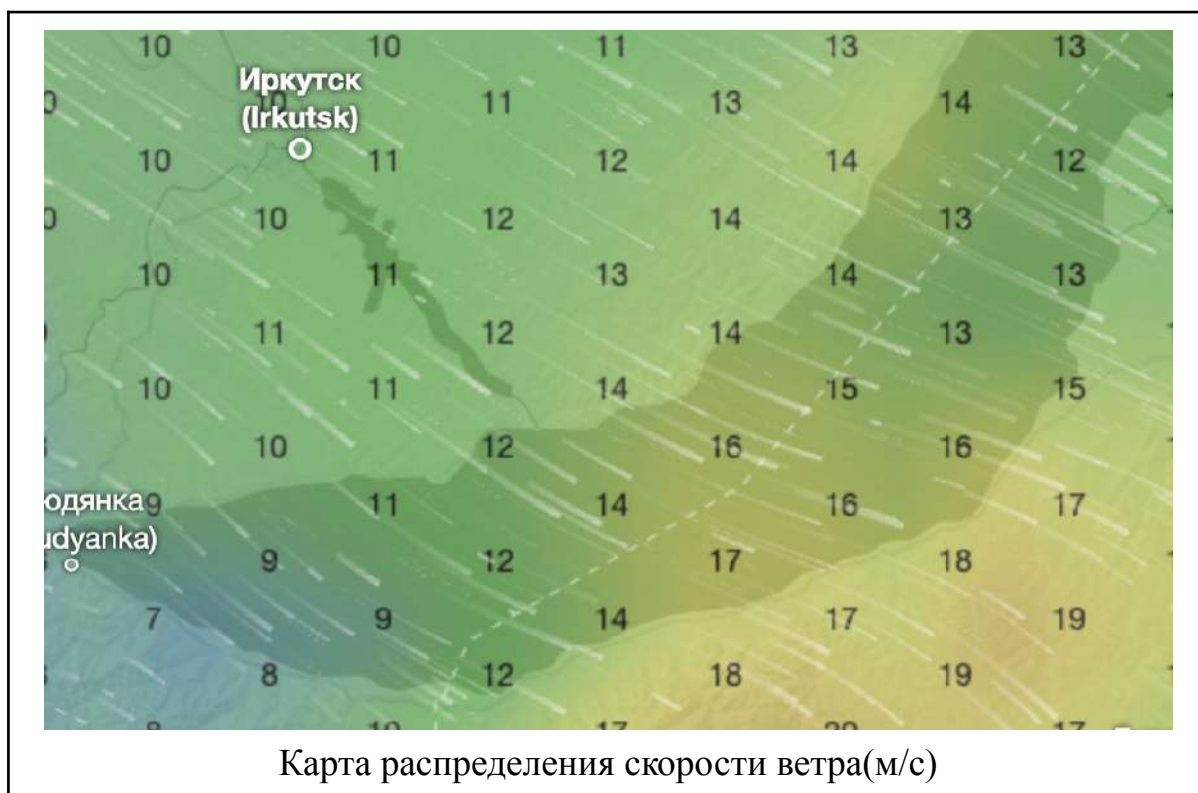


Рисунок А.26 - Бора на озере Байкал. 01.01.2018 23:00 UTC

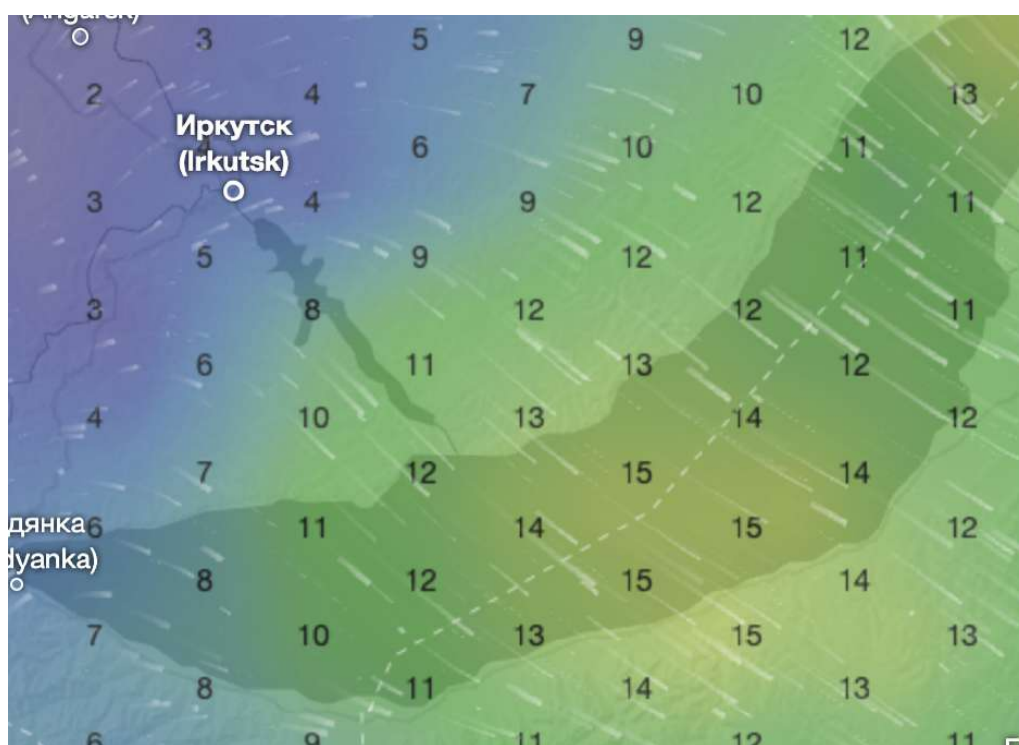
## ПРИЛОЖЕНИЕ А



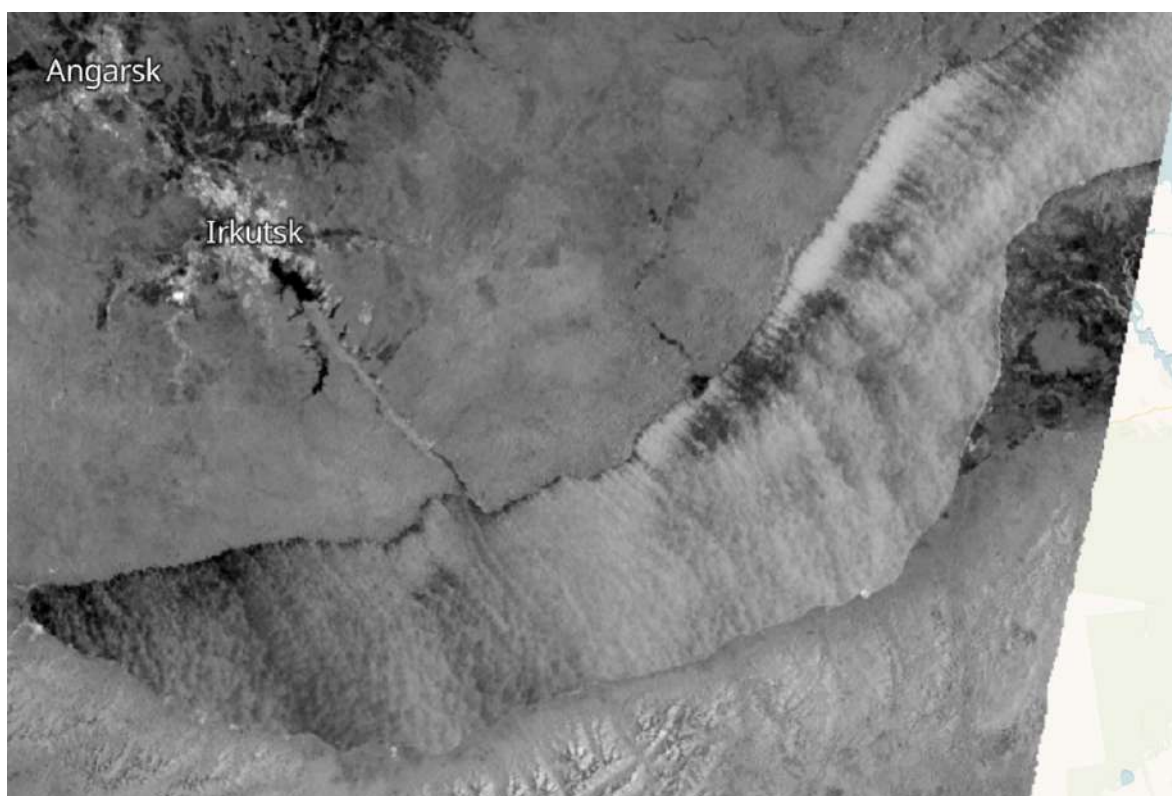
Спутниковый снимок Sentinel-1

Рисунок А.27 - Бора на озере Байкал. 08.12.2017 23:00 UTC

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



Карта распределения скорости ветра(м/с)



Спутниковый снимок Sentinel-1

Рисунок А.28 - Бора на озере Байкал. 26.11.2017 23:00 UTC

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

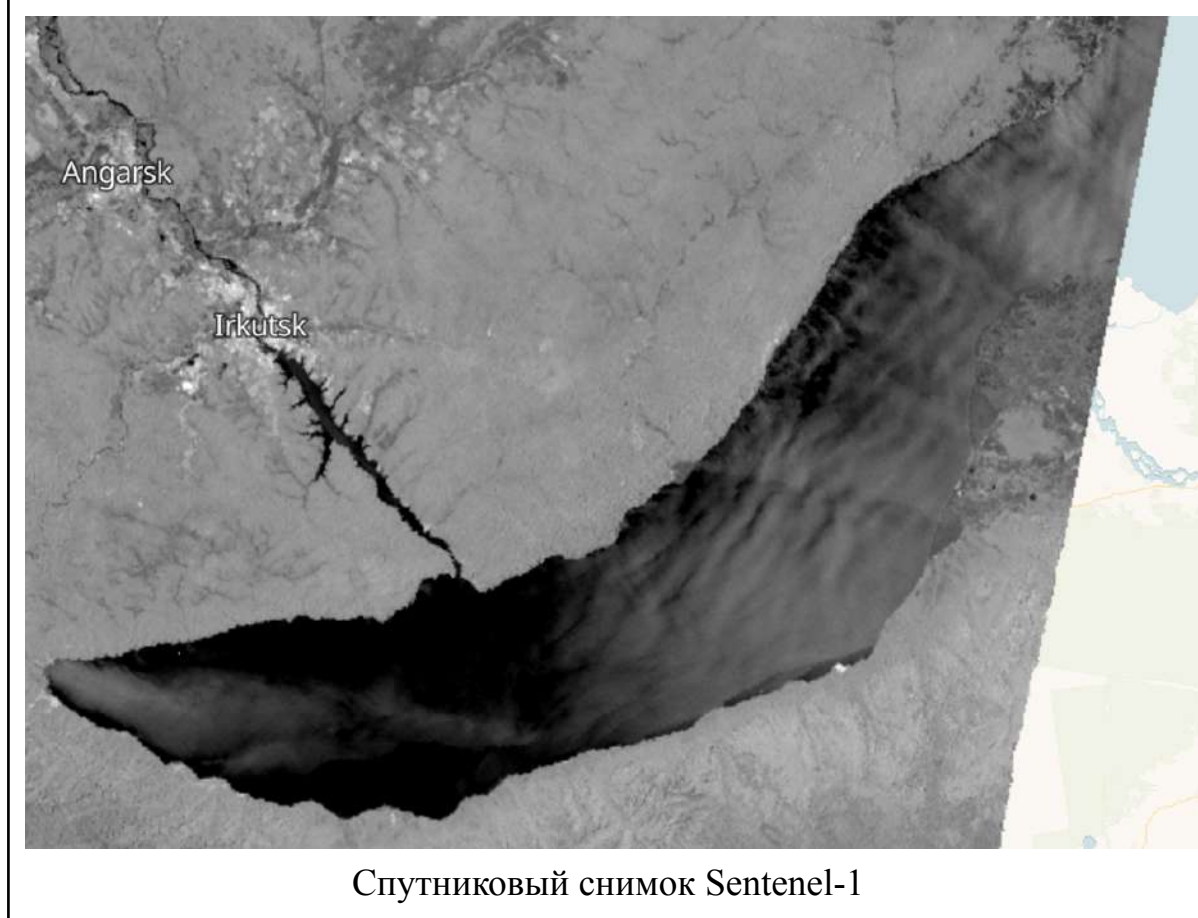
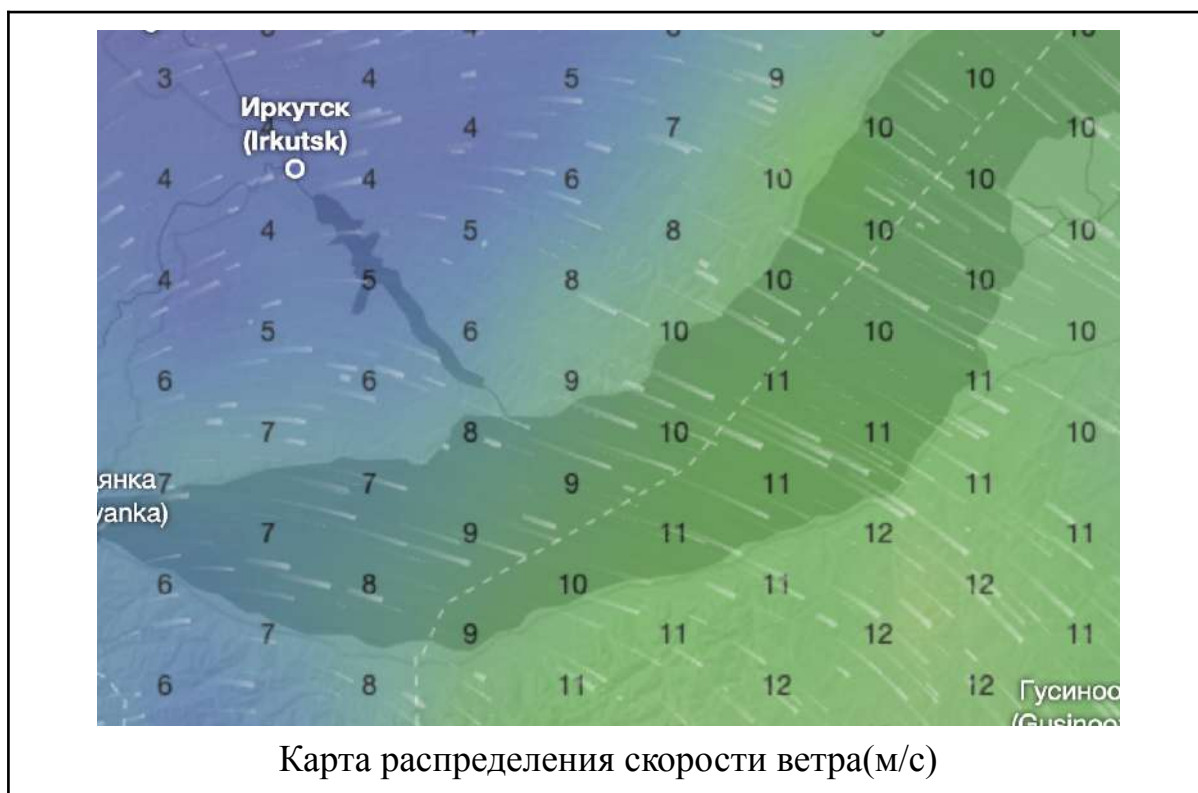


Рисунок А.29 - Бора на озере Байкал. 03.09.2017 23:00 UTC