



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
(магистерская диссертация)

На тему «Анализ условий формирования Байкальской боры с использованием
радиолокационной спутниковой съёмки»

Исполнитель **Слюсарь Людмила Сергеевна**
(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)

«18» февраля 2026 г.

Санкт-Петербург
2026

Содержание

Введение.....	3
1. Теоретические основы и физические механизмы образования местных ветров.....	7
1.1 Метеорологическая природа местных ветров: анабатические и катабатические потоки	7
1.2 Особенности формирования и классификация боры.....	14
1.3 Географические и климатические факторы, влияющие на ветровой режим озера Байкал	19
2. Дистанционное зондирование и методика анализа данных.....	26
2.1 Физические основы радиолокационного зондирования водной поверхности	26
2.2 Характеристики спутника Sentinel -1 и продуктов Level -1 GRD для метеорологических исследований.....	30
2.3 Методика совместного анализа радиолокационных изображений и данных метеорологического реанализа	33
3. Анализ пространственной изменчивости ветровых полей на Байкале по данным спутникового зондирования и реанализа	35
3.1 Типизация метеорологических ситуаций и синоптических условий	35
3.2 Детальный анализ мезомасштабной структуры интенсивной боры	49
3.3 Исследование эффектов орографической трансформации и зон «ветровой тени»	52
3.4 Особенности радиолокационной визуализации в условиях термической неустойчивости.....	60
Заключение	65
Список используемых источников.....	69

Введение

Изучение мезомасштабных атмосферных процессов над акваториями крупных внутренних водоемов является одним из наиболее динамично развивающихся направлений современной метеорологии и дистанционного зондирования Земли. Озеро Байкал, обладающее уникальной котловиной и сложнейшей орографией побережья, представляет собой естественную лабораторию для исследования локальных ветровых систем. Среди них особое значение имеет район Малого моря, где физико-географические условия способствуют формированию экстремальных воздушных потоков, известных как Сарминская бора.

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью повышения точности мониторинга и прогнозирования опасных метеорологических явлений. Традиционная сеть наземных метеорологических станций в байкальском регионе характеризуется низкой плотностью и неравномерностью распределения. В условиях пересеченного рельефа данные станций, расположенных в защищенных бухтах или на удалении от эпицентров ветровых струй, не могут дать адекватного представления о реальной пространственной структуре ветра над всей акваторией. В то же время, современные численные модели атмосферного реанализа (такие как ERA5), несмотря на использование мощных вычислительных алгоритмов, сталкиваются с проблемой сглаживания локальных экстремумов из-за недостаточного пространственного разрешения.

В этом контексте использование данных спутниковой радиолокации (SAR), в частности миссии Sentinel-1, становится безальтернативным инструментом для получения детальных карт ветрового поля. Способность радиолокатора «видеть» через облачность и в темное время суток, фиксируя микронную шероховатость водной поверхности, позволяет восстанавливать структуру ветра с разрешением до нескольких десятков метров. Однако применение этого метода в условиях Байкала требует глубокого учета региональной специфики - температурных инверсий, парения воды и

орографической трансформации потоков, что и предопределяет выбор темы данной работы.

Целью работы является комплексное исследование пространственно - временной изменчивости и мезомасштабной структуры ветровых полей акватории Малого моря на основе синтеза радиолокационных данных спутника Sentinel -1, инструментов метеорологического реанализа и контактных измерений.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести детальный анализ физико -географических и синоптических факторов, определяющих ветровой режим Малого моря, с акцентом на механизмы формирования боры.
2. Изучить теоретические и методические основы восстановления скорости приземного ветра по данным радиолокационного обратного рассеяния.
3. Разработать алгоритм совмещения разнородных данных (спутниковых снимков, карт давления и температуры Reanalysis, данных станций) в единой временной сетке.
4. Выполнить типизацию метеорологических ситуаций (интенсивная бора, умеренный ветер, конвективный тип) и проанализировать их визуализацию на РСА -снимках.
5. Исследовать мезомасштабные эффекты: структуру струйных течений («факелов»), динамику орографических теней и влияние вертикальной устойчивости атмосферы.
6. Оценить достоверность спутниковых данных в условиях экстремальных температурных контрастов и разработать критерии отличия реальных штормов от ложных сигналов, вызванных термической конвекцией.

Объектом исследования является ветровой режим и состояние приводного слоя атмосферы над акваторией Малого моря. Предметом исследования выступает мезомасштабная пространственная структура ветровых полей и закономерности их трансформации под влиянием рельефа и термодинамических параметров.

Методология и методы исследования. Работа базируется на комплексном системном подходе. В качестве основных методов используются:

- Радиолокационное дистанционное зондирование (интерпретация данных Sentinel -1 Level -1 GRD).
- Математическое моделирование и метеорологический реанализ (использование массивов ERA5 и визуализация в среде Panoply).
- Статистический и сравнительный анализ спутниковых данных и контактных измерений метеостанций (Хужир, Солнечная).
- Картографический метод для визуализации зон ветрового риска.

Научная новизна исследования заключается в следующих аспектах:

- Впервые для акватории Малого моря проведена детальная верификация спутниковых данных Sentinel -1 в условиях сверхнизких температур.
- Выявлена закономерность сужения зон ветровой тени под влиянием сезонного выхолаживания воздушных масс.
- Описан и физически обоснован эффект «ложной шероховатости» на РЛ -снимках, возникающий при интенсивном теплообмене («парении») воды, и предложен метод его коррекции с помощью барических полей.
- Уточнена морфология Сарминских струйных течений, показан их пульсирующий и узконаправленный характер, не фиксируемый стандартными сетками реанализа.

Практическая значимость работы. Полученные результаты имеют прямое прикладное значение для обеспечения безопасности на озере Байкал. Детальные карты распределения ветровых нагрузок и понимание границ ветровых теней

необходимы для оптимизации маршрутов судоходства и навигации маломерного флота, планирования туристической деятельности в районе острова Ольхон, совершенствования систем предупреждения об опасных метеорологических явлениях, а так же калибровки региональных прогностических моделей.

1. Теоретические основы и физические механизмы образования местных ветров

1.1 Метеорологическая природа местных ветров: анабатические и кatabатические потоки

Когда мы говорим о ветре в глобальном масштабе, мы обычно представляем себе движение огромных воздушных масс, вызванное разницей в давлении между циклонами и антициклонами. Однако в условиях сильно пересеченной местности, таких как побережье Байкала, общая циркуляция атмосферы вступает в сложное взаимодействие с рельефом. Здесь рождаются местные ветры - явления, масштаб которых ограничен конкретной долиной или склоном, но чья сила и влияние на микроклимат могут быть колоссальными. В основе этих движений лежит фундаментальное свойство воздуха изменять свою плотность при нагревании или охлаждении, что превращает каждый склон горы в своеобразный тепловой насос.

Механизм возникновения местных ветров неразрывно связан с суточным ходом радиационного баланса. В светлое время суток солнечные лучи нагревают поверхность земли. Однако нагрев происходит неравномерно. Поверхность горных склонов, обращенная к солнцу, получает значительно больше энергии, чем свободная атмосфера на той же высоте. Воздух, непосредственно соприкасающийся с прогретой почвой или скалами, становится теплее окружающего его «свободного» воздуха. Как известно из базовой физики, теплый воздух менее плотен и легче холодного, а значит, под действием силы Архимеда он начинает стремиться вверх. Так рождаются анабатические потоки, которые мы чаще называем долинными или склоновыми ветрами дневного цикла.

Анабатический поток (рисунок 1.1) - это не просто движение воздуха, это целая система циркуляции. Поднимаясь вдоль склона, этот теплый воздух освобождает место, которое тут же заполняется более прохладными массами из

центра долины или с поверхности водного объекта, например, с Байкала. Это движение происходит плавно и обычно достигает своего пика в послеполуденные часы. Интересно, что анабатические ветры играют роль своеобразного «лифта» для влаги и аэрозолей: именно благодаря им над вершинами гор во второй половине дня часто формируются кучевые облака, даже если на равнине небо остается абсолютно чистым. Эти потоки создают ощущение мягкого, восходящего движения, которое так ценят планеристы и хищные птицы, использующие термики для парения.

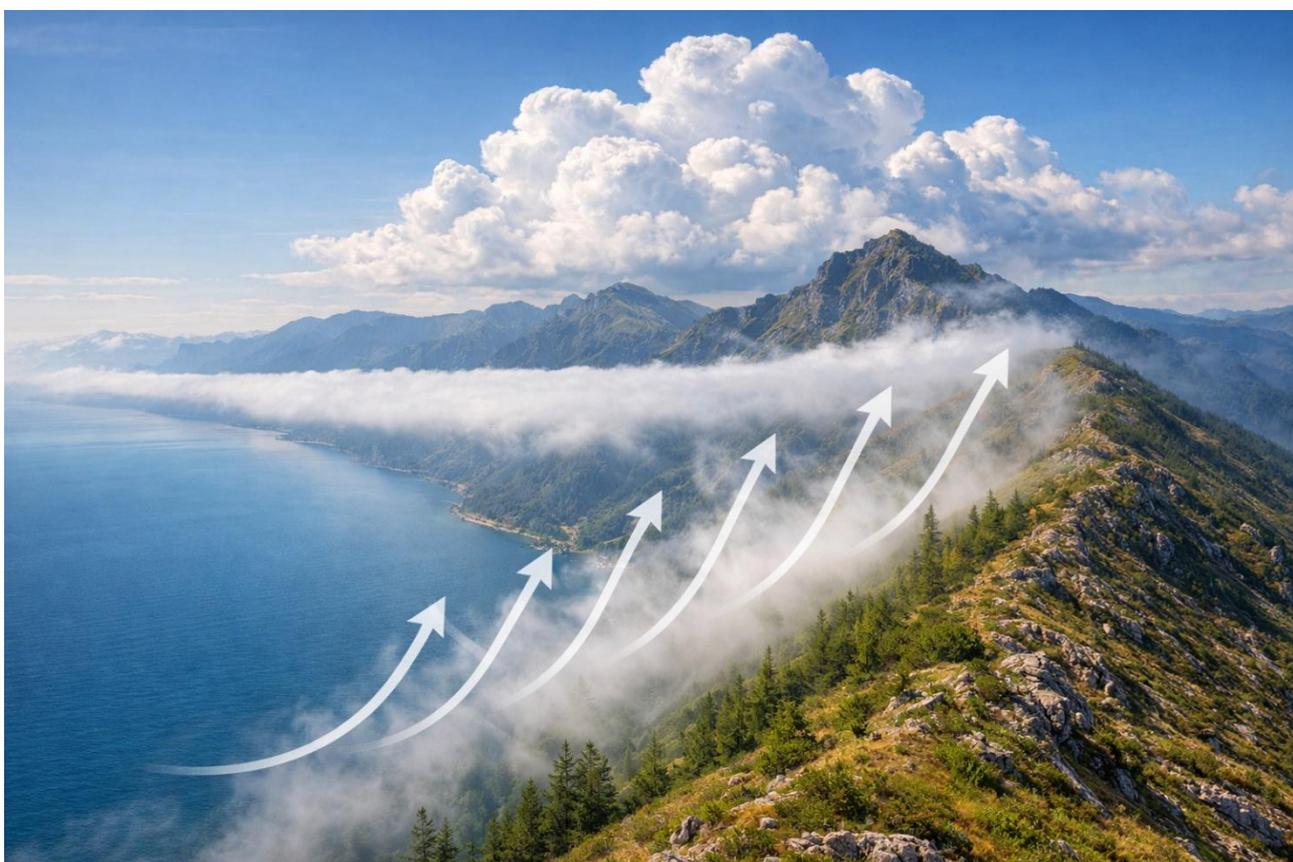


Рисунок 1.1 - Анабатический поток ветра

Однако с заходом солнца ситуация меняется на противоположную, и в игру вступают кatabатические потоки, которые имеют куда более суровый нрав. Как только солнечная радиация перестает подпитывать склоны теплом, начинается процесс активного выхолаживания поверхности. Земля отдает тепло в

космическое пространство через длинноволновое излучение. В условиях разреженного горного воздуха этот процесс идет крайне быстро. Воздух, прилегающий к склонам, остывает, становится плотнее и тяжелее окружающей среды. Не имея возможности удерживаться на высоте, этот «тяжелый» воздух начинает под действием силы тяжести стекать вниз, в долины и к подножиям гор.

Катабатический ветер (рисунок 1.2) - это, по сути, гравитационный поток. Если анабатический ветер днем «всплывает», то катабатический ночью «падает». Скорость этого падения напрямую зависит от крутизны склона и разницы температур между охлажденным воздухом и теплым воздухом внизу. На Байкале, где горные хребты подступают почти вплотную к воде, температурные контрасты между сушей и незамерзающим озером могут быть огромными, эти потоки приобретают особую мощь.



Рисунок 1.2 - Катабатический поток ветра

Важно понимать, что кататические ветры не всегда остаются мирным ночным бризом. При определенных условиях они могут аккумулироваться в огромных количествах в высокогорных котловинах или за хребтами. Когда такая масса холодного воздуха достигает критического объема или получает импульс от общего атмосферного переноса, она «переваливает» через гребень и обрушивается вниз. В этот момент потенциальная энергия накопленного холода мгновенно переходит в кинетическую энергию движения. Воздух разгоняется, сжимаясь и иногда немного нагреваясь адиабатически, но оставаясь при этом намного холоднее того воздуха, который он вытесняет вниз. Именно в этот момент рождается предвестник боры.

Чтобы понять, почему воздух начинает свое движение вдоль склона, недостаточно просто сказать, что он нагрелся. Важно проследить путь «воздушной частицы» на термодинамической сетке координат. Представим себе вертикальный разрез атмосферы над байкальским хребтом. В спокойном состоянии атмосфера стратифицирована: температура падает с высотой. На термодинамической диаграмме это отображается кривой состояния.

Днем, когда солнце начинает прогревать подстилающую поверхность склона, тонкий слой воздуха непосредственно у земли получает избыточное количество тепла. На диаграмме мы видим, как точка, обозначающая состояние этого приземного слоя, смещается вправо, вдоль изотерм, в сторону более высоких температур. Как только температура частицы становится выше температуры окружающего воздуха на той же высоте, возникает положительная плавучесть.

Здесь вступает в силу механизм адиабатического охлаждения. Поднимаясь, частица попадает в области с более низким давлением и расширяется. На термодинамической диаграмме этот процесс идет вдоль линий сухих адиабат. Весь секрет анабатического ветра в том, что склон горы выступает как «постоянный подогреватель». В отличие от свободной атмосферы, где поднимаясь частица быстро перемешивается и остывает, у склона она постоянно подпитывается теплом от нагретых камней. Это создает непрерывную

тягу, подобную тяге в печной трубе. Если влажность воздуха достаточно велика, на диаграмме мы увидим достижение уровня конденсации - точки, где сухая адиабата пересекается с кривой насыщения. В этот момент выделяется скрытая теплота фазового перехода, что дает анабатическому потоку «второе дыхание», превращая его в мощный облакообразующий процесс.

Ночные процессы на термодинамической диаграмме выглядят совершенно иначе и гораздо более драматично с точки зрения механики боры. После захода солнца радиационное выхолаживание быстро сдвигает точку состояния приземного воздуха влево - в сторону низких температур. Плотность воздуха растет.

На диаграмме это проявляется формированием приземной инверсии: ситуация, когда у самой поверхности воздух холоднее, чем на высоте нескольких сотен метров (рисунок 1.3).

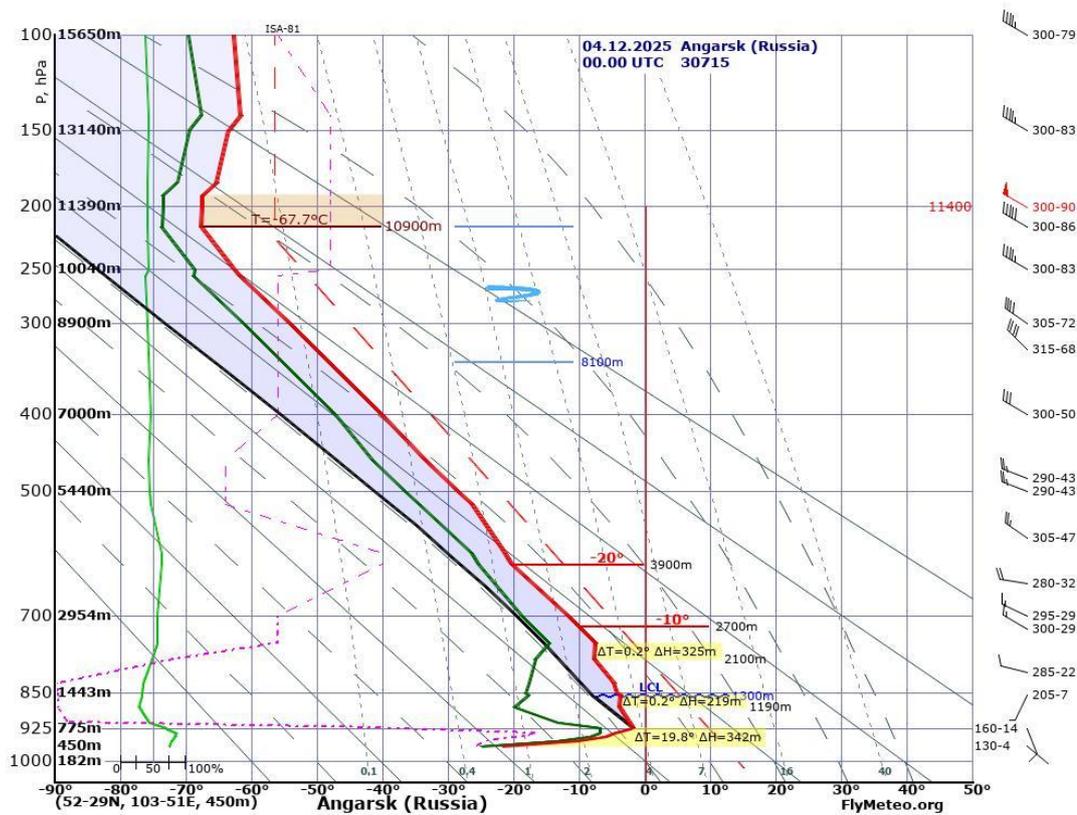


Рисунок 1.3 - Аэрологическая диаграмма за 04.12.2025 на аэрологической станции Ангарск

Линия состояния изгибается в обратную сторону. Этот холодный слой становится крайне устойчивым по отношению к вертикальным перемещениям, но крайне нестабильным по отношению к гравитации на наклонной поверхности.

Когда мы анализируем условия формирования байкальской боры, мы смотрим на разность потенциальных температур. Потенциальная температура - это та температура, которую имел бы воздух, если бы его адиабатически опустили к стандартному давлению на уровне моря. На термодинамической диаграмме кататический поток движется вниз вдоль адиабат. Если за хребтом накопилось огромное «озеро» холодного воздуха с низкой потенциальной температурой, а над самим Байкалом воздух прогрет (особенно осенью и в начале зимы), возникает колоссальный градиент энергии.

Ключевой момент термодинамического разбора здесь заключается в адиабатическом нагреве. При падении с высоты 1000–1500 метров (средняя высота хребтов Прибайкалья) воздух сжимается и нагревается примерно на 1 градус на каждые 100 метров спуска. Казалось бы, он должен приходиться к подножию теплым? Но термодинамика боры такова, что исходная воздушная масса за хребтом настолько холоднее байкальской, что даже после адиабатического согрева она остается значительно плотнее и холоднее местного воздуха. На графике это выглядит как резкое «проваливание» линии состояния вниз.

Этот процесс можно сравнить с термодинамическим ударом. Плотный поток, разогнанный гравитацией, буквально выбивает теплый воздух над акваторией озера. Именно поэтому на спутниковых снимках мы видим четкую границу: там, где термодинамическое равновесие нарушено этим вторжением, поверхность воды мгновенно покрывается ячеистой структурой или резкими ветровыми полосами.

Разбор диаграмм позволяет метеорологу понять, будет ли стоковый ветер обычным тихим ночным дуновением или превратится в разрушительную сарму. Если на диаграмме виден слой задерживающей инверсии чуть выше гребня хребта, это создает эффект «крышки». Воздух вынужден протекать в узком

зазоре между хребтом и этим слоем инверсии, что по законам гидродинамики (эффект Бернулли) резко увеличивает его скорость, термодинамика стратификации атмосферы напрямую переходит в кинетическую энергию ветра, которую мы затем фиксируем с помощью радиолокации.

Анализ этих тонких энергетических переходов между потенциальной энергией положения холодного воздуха и его кинетической силой при падении является фундаментом для понимания всей физики байкальской боры. Без учета этих «диаграммных» переходов невозможно адекватно интерпретировать данные спутниковой съемки, так как радар видит лишь конечный результат - возмущение водной поверхности, но причина этого возмущения скрыта в невидимых термодинамических процессах над горами.

Разница между обычным стоковым ветром и опасным явлением заключается в масштабе и динамике. Обычный кatabатический поток затихает, достигнув дна долины, где он формирует так называемые «озера холода» или инверсионные слои. Но если рельеф имеет форму сужающегося желоба или ущелья (как в случае с долиной реки Сарма), поток испытывает эффект сопла - его скорость резко возрастает из-за необходимости пропустить огромный объем воздуха через узкое пространство. Здесь метеорология встречается с гидродинамикой: воздух ведет себя как вода, падающая с плотины.

Природа этих ветров глубоко дуалистична. Дневные анабатические потоки - это создатели облачности и переносчики тепла, они способствуют перемешиванию атмосферы и выравниванию температур. Ночные кatabатические потоки - это силы очищения и охлаждения. В условиях Байкала они являются главными архитекторами погоды. Когда мы наблюдаем за ними через объектив спутникового радиолокатора, мы видим не просто рябь на воде, мы видим отпечатки этих мощных невидимых рек. Радар фиксирует зоны повышенной шероховатости там, где падающий со скал холодный воздух буквально «вгрызается» в поверхность озера, создавая мелкомасштабное волнение.

Понимание того, что бора начинается именно как локальный кatabатический процесс, крайне важно для анализа спутниковых снимков. Мы должны искать не просто сильный ветер, а следы гравитационного падения воздушных масс. Катабатическая природа боры объясняет её порывистость и неоднородность. Поскольку плотный холодный воздух движется неравномерно, он часто разбивается на отдельные струи, направление которых диктуется каждой ложбиной и каждым распадком на склоне хребта.

В заключение этого раздела стоит отметить, что разделение на анабатические и катабатические потоки является ключом к пониманию энергетического баланса региона. Без этих движений воздух над Байкалом был бы застойным и стратифицированным. Эти ветры - это дыхание гор, которое в случае с борой превращается в яростный крик, способный менять ландшафт и диктовать условия жизни человеку. Изучая их метеорологическую природу, мы понимаем, что бора - это не случайная аномалия, а закономерный результат стремления атмосферы к равновесию в условиях невероятно сложной и красивой земной поверхности.

1.2 Особенности формирования и классификация боры

Для того чтобы понять истинную природу боры, её необходимо рассматривать в контексте извечного противостояния двух фундаментальных типов нисходящих ветров: боры и фёна (рис. 1.4). На первый взгляд они кажутся близнецами - оба рождаются в горах, оба обрушиваются в долины с огромной скоростью. Но их «генетический код» совершенно различен. Если фён - это ветер, приносящий тепло и сухость, то бора - это дыхание арктического холода, которое не согревается даже при падении с километровых высот.

Главное отличие кроется в исходном состоянии воздушных масс. Фён возникает, когда влажный воздух поднимается по наветренному склону, теряет влагу в виде осадков и, перевалив через гребень, опускается вниз, нагреваясь по сухоадиабатическому закону. В результате в долину приходит воздух

значительно более теплый, чем тот, что был там до его появления. Бора же - это триумф плотности и холода. Для её формирования за горным хребтом должен скопиться огромный резервуар холодного воздуха. Когда уровень этого «воздушного озера» превышает высоту перевалов, тяжелый воздух начинает буквально переливаться через край.

Ветер	Генетическая характеристика		Морфологическая характеристика		Общепринятое определение
	Особенность топографии	Особенность возмущения 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 1.4 – Классификация местных кататических ветров по Бурману

В метеорологии принято выделять несколько типов боры в зависимости от того, какие силы доминируют в её создании.

1. Стечная (гравитационная) бора. Это наиболее «чистый» вид боры, классический пример которой мы часто наблюдаем на Байкале. Она возникает в условиях, когда разность давлений между наветренной и подветренной сторонами хребта невелика, но разница в плотности воздуха огромна. Холодный воздух просто «стекает» вниз под действием собственной тяжести, как густой сироп. На Байкале такая бора часто локализована вблизи устьев горных рек и падей.

2. Смешанная (фронтальная) бора. Этот тип связан с прохождением холодного фронта. Синоптическая ситуация здесь более агрессивна: мощный циклон или антициклон создает большой барический градиент, который буквально проталкивает холодные массы через горы. Такая бора наиболее масштабна, она может охватывать сотни километров акватории и продолжаться несколько суток. Именно фронтальная бора на Байкале превращается в знаменитую «сарму», способную переворачивать суда.
3. Черная бора. Редкое, но крайне опасное явление, возникающее при прохождении глубоких циклонов. В отличие от обычной «белой» боры, которая часто сопровождается ясным небом над морем (но «облачной шапкой» на горах), черная бора сопровождается обильными осадками и предельно низкой видимостью.

Для того чтобы бора состоялась, природа должна соблюсти три важнейших условия. Первое - это наличие орографического барьера (рис. 1.5). Хребты должны быть достаточно высокими, чтобы удерживать холодный воздух до момента его критического накопления, но не слишком высокими, чтобы поток не успел адиабатически прогреться до комфортных температур при спуске.

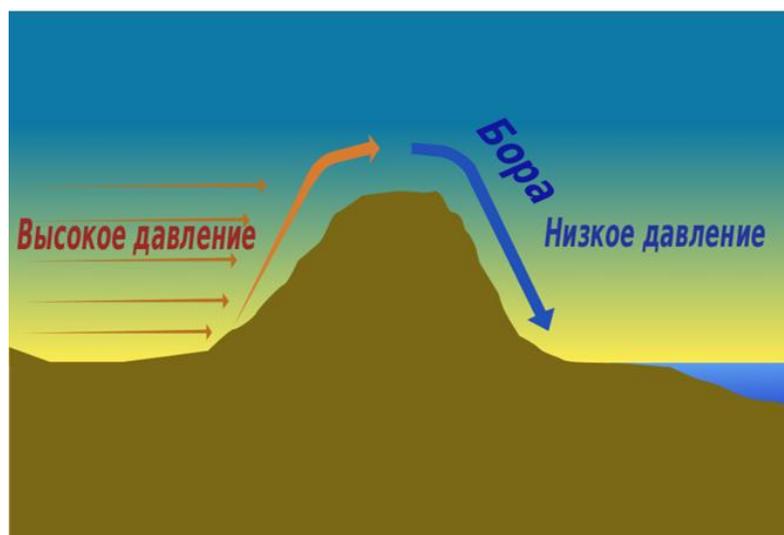


Рисунок 1.5 – Формирование боры

Второе - контраст плотности. Чем холоднее воздух за хребтом и чем теплее (и, следовательно, разреженнее) воздух над Байкалом, тем яростнее будет падение. Третье - синоптическая поддержка. Без определенного распределения давления (высокое - над сушей, низкое - над озером) поток быстро иссякнет.

Одним из самых характерных и визуально выразительных признаков готовящейся или уже начавшейся бора является специфическая облачная формация над гребнем хребта. В метеорологической литературе и в среде профессиональных синоптиков это явление часто называют «флагом», «шапкой» или «воротом». Этот феномен - не просто декоративный элемент пейзажа, а прямое следствие термодинамических процессов, происходящих на границе раздела двух воздушных масс.

Когда мощный поток холодного и влажного воздуха приближается к горному хребту с наветренной стороны, он вынужден подниматься. По мере подъема давление падает, и воздух адиабатически охлаждается. Достигнув уровня конденсации, водяной пар превращается в капли воды - так над вершинами гор формируется плотная пелена облаков. Особенность этого облака заключается в том, что оно кажется неподвижным, хотя внутри него воздух несется с огромной скоростью.

На Байкале, глядя со стороны западного берега на Приморский хребет, можно наблюдать, как белые облачные массы буквально «переливаются» через скалистые вершины, напоминая гигантский водопад. Однако, в отличие от обычной облачности, этот поток часто резко обрывается на подветренном склоне. Это происходит из-за того, что при нисходящем движении воздух начинает адиабатически нагреваться, относительная влажность падает, и облачные капли мгновенно испаряются.

Визуально это выглядит как четкий, почти ровный край облачности, застывший над перевалом. Если этот «край» начинает опускаться ниже по склону, это верный признак того, что кинетическая энергия потока растет и бора вот-вот обрушится на акваторию (рис. 1.6). В случае с легендарной сармой, облачный флаг над Сарминским ущельем может иметь клочковатую,

«разорванную» структуру, что свидетельствует о крайней турбулентности потока.



Рисунок 1.6 – Бора

Почему описание облачного флага так важно в работе, посвященной радиолокации? Дело в том, что радиолокатор «видит» поверхность воды, но «не видит» сами облака. Однако зная физику формирования облачного флага, исследователь может сопоставить архивные данные оптических спутников (например, Sentinel -2 или Terra/Aqua) с данными радара (Sentinel -1).

- Индикация силы: чем плотнее и протяженнее облачный флаг, тем мощнее слой холодного воздуха за хребтом.
- Прогностический признак: в оперативной метеорологии появление «шапки» на горах является сигналом штормового предупреждения. Для магистерской диссертации это служит важным аргументом при выборе конкретных снимков для анализа: если на оптическом снимке за этот же

час виден «флаг», значит, возмущения на воде, зафиксированные радаром, с вероятностью 100% являются именно борой, а не обычным термическим бризом.

Следовательно, облачный флаг - это своеобразный «визуальный барометр» боры. Он маркирует точку, где потенциальная энергия воздуха переходит в кинетическую. В структуре диссертации это описание позволяет подвести теоретическую базу под визуальное дешифрирование снимков, объясняя, почему в одних случаях ветер сопровождается облачностью, а в других (при «черной боре») захватывает всё видимое пространство, стирая границы между небом и водой.

Бора - это не просто движение воздуха, это сложный акт перераспределения энергии, где потенциальная энергия накопленного холода превращается в кинетическую ярость шторма. В сравнении с фёном, бора - это ветер- завоеватель, который не подстраивается под местный климат, а радикально и мгновенно меняет его.

1.3 Географические и климатические факторы, влияющие на ветровой режим озера Байкал

Для того чтобы понять, почему именно на Байкале местные ветры достигают такой сокрушительной силы, недостаточно рассматривать только движение воздушных масс. Необходимо детально изучить ту «чашу», в которой эти процессы разворачиваются. Географическое положение озера и морфология его берегов играют роль не просто декораций, а активных модификаторов атмосферных процессов.

Байкал (рис. 1.7) - это не просто озеро, это глубочайшая тектоническая трещина, окруженная мощными горными хребтами, которые играют роль колоссальных волноломов для атмосферных течений. Именно уникальное сочетание геометрии котловины и формы рельефа берегов создает условия, при

которых бора на Байкале приобретает характеристики, не встречающиеся больше нигде в мире.

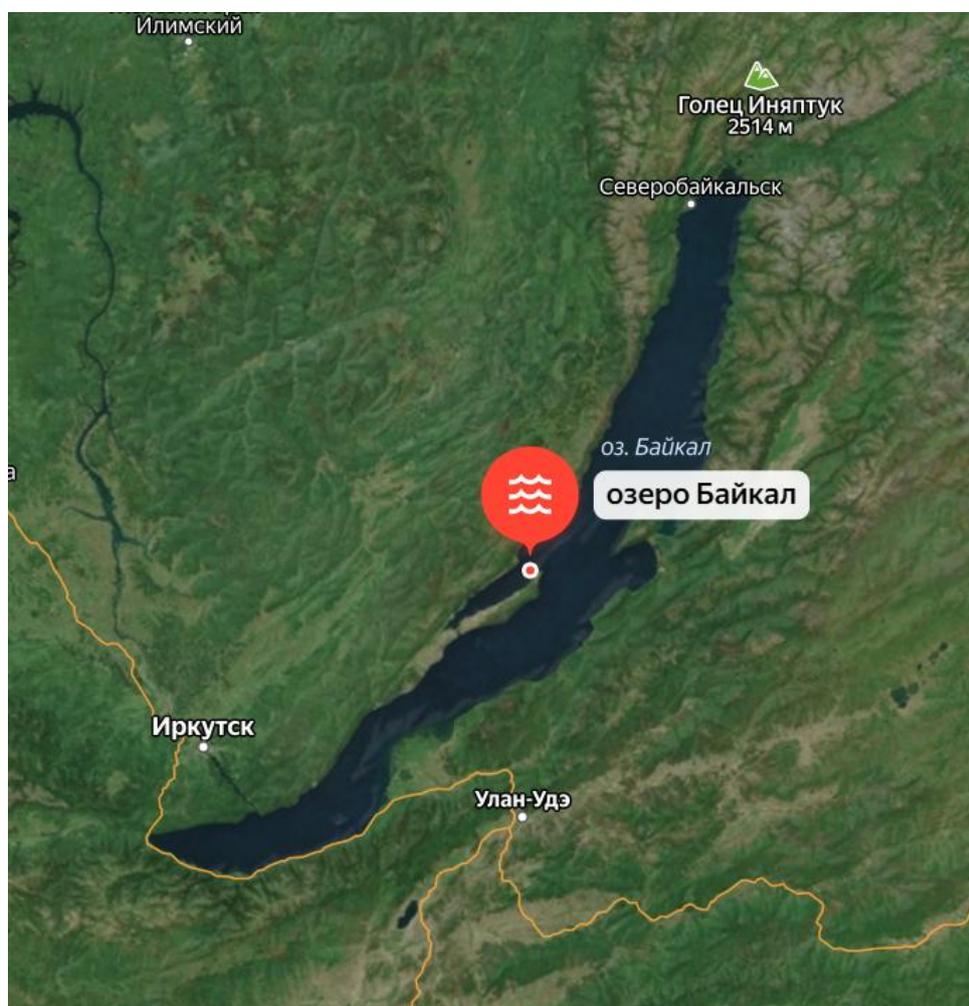


Рисунок 1.7 – Озеро Байкал

В отличие от морской бора, байкальская сильно деформируется береговой линией. Из-за того, что хребты расположены очень близко к урезу воды, зона максимального усиления ветра начинается практически от самого берега. Однако из-за кривизны берега возникают зоны «ветровой тени». На радиолокационных изображениях это проявляется в виде чередования темных (штилевых) и светлых (штормовых) пятен. Специфика Байкала в том, что эти зоны стабильны: зная рельеф, можно с высокой точностью предсказать, где именно ударит сарма, а где в это время будет относительно тихо. Эта

географическая детерминированность делает Байкал идеальным объектом для верификации спутниковых алгоритмов восстановления ветра.

Основным географическим фактором является мезорельеф. Байкал окружен хребтами: на западном берегу это Приморский и Байкальский хребты, на восточном и южном - Хамар-Дабан, Улан-Бургасы и Баргузинский хребет (рис. 1.8). Средняя высота этих гор колеблется от 1000 до 2500 метров над уровнем моря. Эти хребты служат непреодолимым барьером для низких слоев атмосферы.

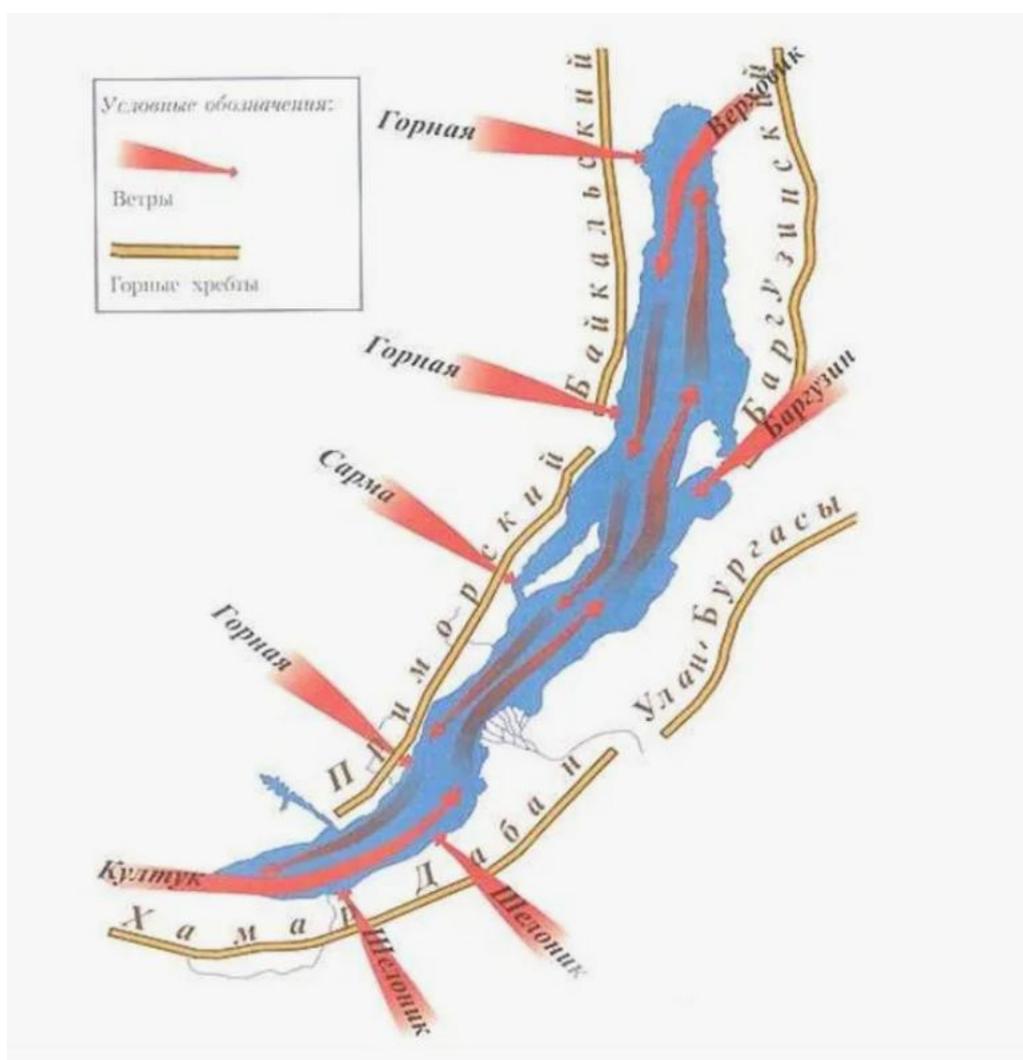


Рисунок 1.8 – Схема мезорельефа озера Байкал

Когда холодный воздух движется со стороны Среднесибирского плоскогорья, он «подпирает» Приморский хребет. Здесь география диктует физику: если бы берега были пологими, воздух просто равномерно распределился бы над водой. Но наличие крутых склонов заставляет воздушную массу накапливаться до тех пор, пока её толщина не превысит высоту перевалов, а горы создают эффект «плотины», за которой копится потенциальная энергия будущего шторма.

В этот момент вступает в силу закон Бернулли: при прохождении через сужение поток сжимается, а его скорость резко возрастает. В устье реки Сарма долину с двух сторон поджимают крутые скальные стенки, образуя идеальное аэродинамическое сопло. На выходе из такого «горлышка» ветер может разгоняться до 60 м/с и более.

В классификации байкальских ветров бору часто выделяют по географическому признаку: Сарма, Харахаиха, Бугульдейка. Каждая из них - это бора, но со своим характером, продиктованным формой того «горлышка», через которое воздух вырывается на свободу. Понимание этих различий и классификационных признаков критически важно для анализа спутниковых данных. Ведь на спутниковых снимках мы видим не только скорость, но и морфологию ветра - по тому, как расходятся «ветровые веера» от устьев рек, мы можем классифицировать тип боры, не имея под рукой наземных данных.

Климат Байкальского региона резко континентальный, однако само озеро вносит в него существенные коррективы, превращаясь в гигантский тепловой аккумулятор. Огромная масса воды (23 тысячи кубических километров) остывает крайне медленно. В осенне-зимний период, когда над сушей уже властвуют арктические антициклоны с температурами $-20^{\circ}\dots -30^{\circ}\text{C}$, вода Байкала еще сохраняет положительную температуру. Это создает постоянный климатический контраст. Над теплой водой давление всегда несколько ниже, чем над ледяными горами. Эта разница давлений (барический градиент) существует практически постоянно в переходные сезоны, создавая «запрос» на приток воздуха с берега. Кроме того, над открытой водой осенью формируется

неустойчивая стратификация атмосферы: теплый воздух поднимается вверх, освобождая место для тяжелых масс, падающих с гор. Климатическая разница температур между «ледяным» берегом и «теплым» озером является главным двигателем, ускоряющим байкальскую бору. Бора на Байкале - это не просто горизонтальный ветер, это обрушивающийся поток, который при соприкосновении с водой вызывает мощное перемешивание и мгновенное образование «парения» (тумана испарения), что еще больше усложняет метеорологическую обстановку.

Ветровой режим Байкала тесно связан с его ледовым режимом. До тех пор, пока озеро не покрыто льдом (обычно до января), трение воздуха о воду минимально, а теплообмен максимален. Специфика заключается в том, что бора активно проявляет себя в период становления льда. Когда озеро начинает замерзать, бора ломает молодой лед («сокуй»), сбивает его в торосы и переносит на огромные расстояния. Радиолокатор в этот период фиксирует уникальную картину: взаимодействие чистого ветра, открытой воды и дрейфующих ледяных полей. Это превращает анализ боры из чисто метеорологической задачи в комплексную океанографическую проблему. Так же это «золотое время» для сильнейших ветров. Как только устанавливается сплошной ледяной покров, шероховатость поверхности меняется, а главное - прекращается поток тепла от воды в атмосферу. Это приводит к резкому изменению структуры местных ветров: они становятся менее порывистыми, так как исчезает термическая «подпитка» вертикальных движений. В контексте глобальных климатических изменений, когда сроки замерзания Байкала сдвигаются на более поздние даты, период активности экстремальных ветров удлиняется, что делает исследование их формирования еще более актуальным.

География береговой линии Байкала определяет векторное распределение ветров. Узкая и длинная форма озера способствует возникновению так называемых продольных ветров (верховик и култук), которые разгоняются вдоль всей оси озера, не встречая препятствий. Однако бора - это всегда поперечный или диагональный ветер.

Особое место в географии байкальской боры занимает пролив Малое Море. Остров Ольхон служит естественным препятствием, которое разделяет поток боры. Сарма (рис. 1.9), вырываясь из одноименного ущелья, пересекает Малое Море и ударяется в склоны Ольхона, частично огибая его и создавая сложную систему завихрений. Этот «лабиринт» из проливов и островов приводит к тому, что бора на Байкале часто носит характер кратковременных, но невероятно сильных ударов (пульсаций), которые моряки называют «зарядами».

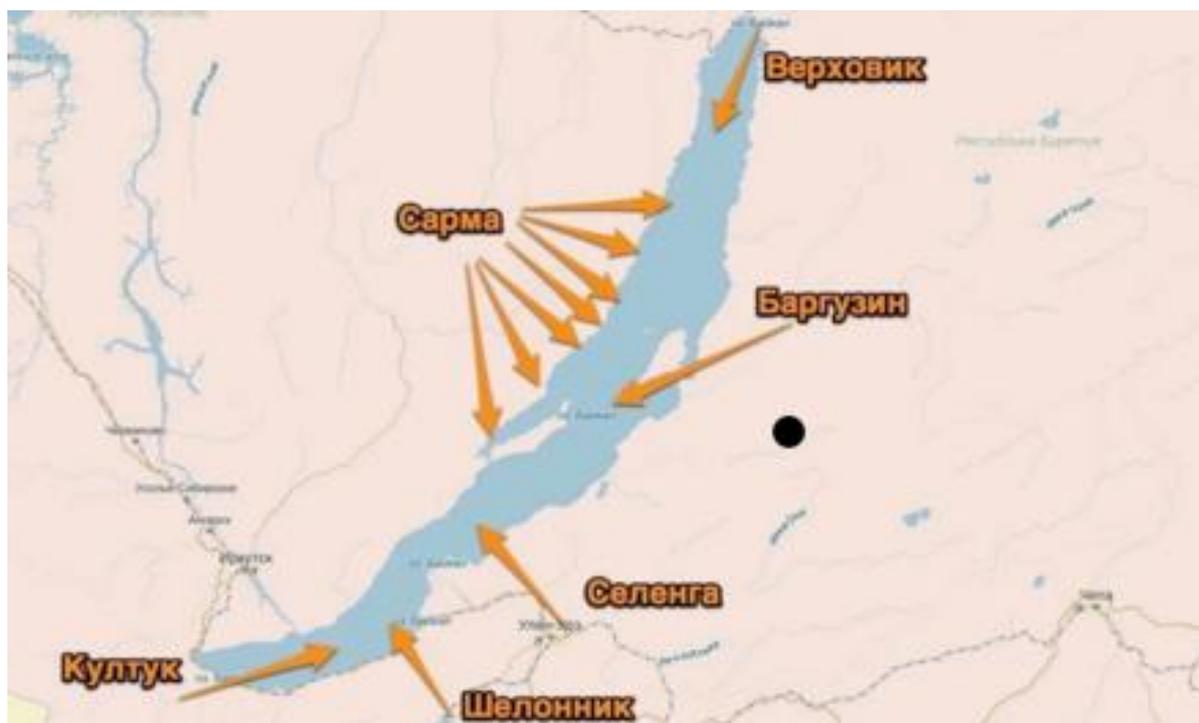


Рисунок 1.9 – Местные ветра озера Байкал

Можно сделать вывод, что ветровой режим Байкала - это результат симбиоза трех факторов:

1. Геометрического (узкая глубокая впадина и высокие крутые хребты).
2. Аэродинамического (наличие поперечных долин -каналов, создающих эффект сопла).
3. Термического (огромный контраст температур между континентальной суши и инертной водной массой).

Эти факторы превращают Байкал в уникальную природную аэродинамическую трубу. Понимание этой географической основы позволяет нам перейти к следующему этапу - изучению того, как эти мощные, географически обусловленные потоки фиксируются современными спутниковыми системами радиолокации, которые способны увидеть «отпечатки» каждого ущелья на поверхности озерной глади.

2. Дистанционное зондирование и методика анализа данных

2.1 Физические основы радиолокационного зондирования водной поверхности

Радиолокационное зондирование Земли из космоса коренным образом отличается от привычной нам оптической съемки. Если обычная камера фиксирует отраженный солнечный свет, то радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА) сам является источником энергии. Он излучает микроволновые импульсы и принимает эхо -сигнал, отраженный от земной или водной поверхности. Для исследования таких явлений, как байкальская бора, это имеет решающее значение: радар «видит» сквозь облака и туман, которые неизменно сопровождают вторжения холодного воздуха.

Когда радиоволна достигает идеально гладкой водной поверхности (штиль), она отражается зеркально - почти вся энергия уходит в сторону от приемника спутника. На радиолокационном снимке такая вода выглядит абсолютно черной. Однако, как только появляется ветер, он начинает взаимодействовать с поверхностью воды, создавая на ней рябь.

Ключевым физическим процессом здесь является резонансное рассеяние Брэгга. Микроволны радара (в случае Sentinel -1 это С -диапазон с длиной волны около 5,6 см) взаимодействуют не со всеми волнами на воде, а преимущественно с теми, чья длина соразмерна длине радиоволны. Эти короткие капиллярные и гравитационно -капиллярные волны (рябь) возникают под действием мгновенного напряжения трения ветра.

Чем сильнее дует ветер, тем интенсивнее становится рябь и тем больше радиоэнергии возвращается обратно к спутнику. Следовательно, яркость пикселя на радиолокационном изображении прямо пропорциональна степени шероховатости воды, которая, в свою очередь, является функцией скорости и направления приземного ветра.

Важным аспектом физики зондирования является влияние состояния водной поверхности, не связанного с ветром. На Байкале, особенно в летне - осенний период, могут наблюдаться пятна биологического происхождения или выходы природных нефтепродуктов (в районах естественных нефтепроявлений на дне). Такие пленки подавляют мелкую капиллярную рябь (эффект «гашения»).

На радиолокационном снимке это создает «ложные штили» - темные пятна, которые можно ошибочно принять за зоны отсутствия ветра. В контексте анализа боры важно понимать, что при скоростях ветра свыше 7–10 м/с (характерных для боры) любые пленки разрываются и перемешиваются, поэтому для штормовых условий этот фактор становится вторичным, что упрощает дешифрирование именно экстремальных ветров.

При описании физики процесса важно упомянуть, что радар реагирует на напряжение трения, которое зависит не только от скорости ветра, но и от стабильности атмосферы. Поскольку бора - это вторжение холодного воздуха на теплую воду, атмосфера над Байкалом становится крайне неустойчивой.

В физику зондирования вводится понятие «нейтрально -устойчивой скорости» на высоте 10 метров. Если воздух намного холоднее воды (как при боре), шероховатость поверхности будет выше, чем при той же скорости ветра, но в условиях стабильной атмосферы. Это означает, что без учета разницы температур «воздух -вода» радар может слегка завышать реальную скорость ветра, и этот физический нюанс необходимо учитывать при методической обработке данных.

Физика обратного рассеяния сильно меняется в зависимости от того, под каким углом луч радара падает на воду. При малых углах (ближе к надиру) доминирует зеркальное отражение, при больших (от 20 до 45 градусов) - резонансное Брэгговское. Для исследования байкальской боры это критично, так как снимки Sentinel -1 имеют широкую полосу обзора (250 км), и угол падения луча на западном берегу может отличаться от угла на восточном. В тексте стоит отметить, что при интерпретации снимков мы учитываем эту вариативность,

чтобы не принять геометрическое изменение яркости за реальное ослабление ветра.

В более продвинутых исследованиях упоминается, что PCA -сигнал содержит не только информацию об амплитуде (яркости), но и о фазе. Движущаяся рябь в зоне боры создает доплеровский сдвиг частоты. Хотя в стандартных продуктах Level -1 GRD мы работаем с интенсивностью, понимание того, что сигнал формируется движущейся поверхностью, дополняет физическую картину взаимодействия микроволн с бурлящей водой Байкала во время шторма.

Физика зондирования также сильно зависит от угла падения луча и поляризации сигнала. Спутники Sentinel -1 обычно используют вертикальную (VV) или перекрестную (VH) поляризацию. Для восстановления параметров ветра наиболее информативной считается поляризация VV, так как она более чувствительна к изменениям шероховатости, вызванным именно ветровым воздействием, а не биологическими пленками или течениями.

Важно понимать, что радар измеряет не саму скорость ветра в традиционном понимании метеоролога (на высоте 10 метров), а состояние поверхности. Чтобы перейти от яркости снимка к метрам в секунду, используются сложные эмпирические зависимости - геофизические модельные функции (GMF).

Хотя большинство моделей восстановления ветра (таких как CMOD5 или CMOD7) разрабатывались для океана, физика процесса на Байкале остается схожей, но со своими нюансами. Плотность пресной воды и отсутствие океанической зыби (длинных волн, приходящих издалека) делают радиолокационный отклик на Байкале более «чистым» отражением именно локальных ветровых процессов. В условиях боры, когда ветер дует с берега, разгон волн (фетч) невелик, и радар фиксирует начальную стадию развития волнения, что позволяет очень точно локализовать места выхода воздушных струй из горных долин.

Бора - это крайне турбулентный поток. На радиолокационных снимках это проявляется не в виде однородного серого пятна, а в виде сложной текстуры. Мы можем видеть «ветровые полосы» (wind streaks), которые вытянуты вдоль направления потока. Эти структуры возникают из-за организованных вихрей в пограничном слое атмосферы. Таким образом, РСА -съемка дает нам не просто цифру скорости, а визуализацию структуры турбулентности боры, что невозможно получить ни одним другим инструментальным методом.

Несмотря на то что радиоволны С -диапазона (используемые Sentinel -1) считаются «всепогодными», при изучении экстремальных явлений типа боры необходимо учитывать влияние интенсивных осадков. В моменты прохождения холодного фронта бора на Байкале может сопровождаться сильными зарядами снега или ливневым дождем.

Физика взаимодействия здесь двояка. С одной стороны, капли дождя в атмосфере могут поглощать и рассеивать часть энергии радиолокационного луча, что приводит к ослаблению сигнала. С другой стороны, удары крупных капель о водную поверхность создают дополнительную шероховатость («эффект всплеска»), которая может исказить реальную картину ветрового волнения. Для байкальской боры, которая часто является «сухой» или сопровождается метелью, эффект затухания в атмосфере минимален по сравнению с тропическими циклонами, однако идентификация зон осадков на снимках позволяет избежать ошибок при количественном восстановлении скорости ветра.

Важным физическим ограничением является размер элемента разрешения (пикселя). Для Sentinel -1 в режиме IW (Interferometric Wide) разрешение составляет около 5 на 20 метров. Это позволяет детально видеть структуру «ветровых струй» боры, выходящих из долин. Однако физика формирования сигнала такова, что вблизи крутых берегов Байкала может возникать эффект «радиолокационной тени» или геометрических искажений из-за большой высоты хребтов. Если склон горы слишком крут, радар может не «досветить»

узкую полосу воды непосредственно у подножия, что важно учитывать при анализе начала разгона боры.

Специфика формирования РСА -изображений заключается в наличии «спекл -шума» - зернистости, возникающей из -за интерференции сигналов от множества мелких рассеивателей (капиллярных волн) на поверхности Байкала. Физически это означает, что каждый пиксель несет в себе случайную составляющую. Для того чтобы получить достоверную карту ветра при боре, применяется процедура многократного усреднения (multilooking) или фильтрации. В контексте диссертации это обосновывает необходимость предварительной обработки снимков: мы ищем баланс между сохранением деталей структуры боры (её «языков» и пульсаций) и подавлением физического шума системы.

Физическая природа формирования радиолокационного сигнала на водной поверхности Байкала представляет собой многофакторный процесс. Понимание таких эффектов, как спекл -шум и затухание сигнала в осадках, позволяет критически подходить к интерпретации яркостных характеристик снимков. Для минимизации указанных искажений и получения достоверных карт ветра необходимо использовать специализированные продукты спутникового мониторинга с определенными техническими характеристиками.

2.2 Характеристики спутника Sentinel -1 и продуктов Level -1 GRD для метеорологических исследований

Для исследования такого динамичного и опасного явления, как байкальская бора, выбор пал на космическую миссию Sentinel -1, реализуемую Европейским космическим агентством (ESA) в рамках программы «Copernicus». Эта миссия представляет собой уникальное созвездие из двух идентичных спутников на полярной орбите - Sentinel -1A и Sentinel -1B (хотя на текущий момент основной объем данных поступает с аппарата 1A, запуск последующих аппаратов серии обеспечивает преемственность данных).

Главное преимущество этой миссии для нашего исследования заключается в использовании радара С -диапазона с синтезированной апертурой (С -SAR). В отличие от оптических спутников, которые бессильны перед плотной облачностью и метелями, сопровождающими вторжение холодного воздуха на Байкал, Sentinel -1 обеспечивает стабильный поток данных независимо от погодных условий и освещенности. Это критически важно, так как пик активности байкальской боры приходится на осенне -зимний период, когда световой день короток, а небо над озером часто затянуто облаками испарения.

Спутники движутся по солнечно -синхронной орбите на высоте около 693 км. Для мониторинга Байкала ключевым параметром является период повторения визита. Благодаря широкой полосе захвата и возможности съемки как на восходящих, так и на нисходящих витках, мы имеем возможность получать детальные изображения западного побережья Байкала (основного очага боры) с периодичностью в несколько дней. Это позволяет собрать репрезентативный архив случаев боры за несколько штормовых сезонов для статистического анализа.

Для исследования мезомасштабных ветровых процессов используются продукты уровня Level -1 GRD (Ground Range Detected). В отличие от сырых данных, продукты GRD проходят этап многолучевой обработки, что существенно снижает уровень спекл -шума и делает текстуру изображения более пригодной для визуального выделения ветровых струй и фронтальных разделов. Высокое пространственное разрешение снимков (порядка 10 метров) позволяет идентифицировать элементы орографической трансформации ветра, такие как «факелы» боры, выходящие из узких горных долин, и зоны локальных затиший, которые не фиксируются стандартными метеорологическими моделями.

Для анализа байкальской боры режим IW является оптимальным по следующим причинам:

1. Ширина полосы: 250 км достаточно, чтобы охватить не только эпицентр боры у берега (например, в районе Сармы), но и проследить распространение ветрового «факела» до противоположного берега озера.

2. Разрешение: Продукты IW GRD обладают разрешением около 10 метров, что в тысячи раз превышает разрешение современных моделей реанализа (например, ERA5, визуализируемых в Panoply). Такая детализация позволяет идентифицировать узкие струи боры, выходящие из горных распадков, и точно определять границы «ветровых теней» за орографическими препятствиями.

Использование продуктов Sentinel -1 в режиме IW GRD позволяет минимизировать геометрические искажения, вызванные крутым рельефом Приморского и Байкальского хребтов. Высокая точность определения углов падения в каждой точке снимка позволяет корректно отделять истинные ветровые сигналы от радиолокационных теней, отбрасываемых горными массивами в зоне Малого моря

Спутник Sentinel -1 способен излучать и принимать сигналы в различных поляризационных комбинациях. Чаще всего используются две: VV (вертикальное излучение - вертикальный прием) и VH (вертикальное излучение - горизонтальный прием).

Особое значение для сопоставления с данными реанализа в среде Panoply имеет использование вертикальной поляризации (VV). Физические свойства обратного рассеяния на этой поляризации обеспечивают максимальный контраст при отображении капиллярной ряби на водной поверхности. Это позволяет четко разграничивать зоны штиля (темные участки на снимке) и зоны штормового ветра (яркие участки), обеспечивая высокую достоверность качественного анализа даже без проведения численных расчетов.

Продукты Sentinel -1 обладают высоким динамическим диапазоном, что позволяет им фиксировать как очень слабые сигналы в зонах «ветровой тени» (за горами), так и очень сильные отражения от штормовой воды. Это исключает эффект «насыщения» пикселей (saturation) даже при самых экстремальных порывах сармы, позволяя восстанавливать скорости ветра свыше 30–40 м/с без потери точности.

Выбор продуктов Sentinel -1 обусловлен их способностью фиксировать напряжение трения ветра непосредственно у поверхности воды. Данная физическая величина через геофизическую модельную функцию напрямую соотносится со скоростью ветра на стандартном метеорологическом горизонте 10 метров (U_{10}). Это обеспечивает корректную верификацию результатов спутникового зондирования с данными реанализа и наземных метеостанций.

2.3 Методика совместного анализа радиолокационных изображений и данных метеорологического реанализа

Методика исследования базируется на комплексном качественном и количественном сопоставлении пространственных структур, выявленных на радиолокационных снимках высокого разрешения, с прогностическими полями метеорологического реанализа. В рамках данной работы спутниковые данные Sentinel -1 выступают в роли высокодетального верификатора, позволяющего уточнить локализацию и морфологию ветровых потоков, в то время как данные реанализа обеспечивают необходимый синоптический контекст и количественные показатели вектора приземного ветра. Такой подход позволяет преодолеть основное ограничение стандартных метеорологических моделей - их недостаточную детализацию в условиях резко расчлененного рельефа побережья Байкала.

Процесс анализа начинается с подготовки метеорологических полей в программной среде Panoply, где на основе массивов данных NetCDF (ERA5/GFS) формируются карты атмосферного давления и векторов приземного ветра на стандартном горизонте 10 метров. Использование Panoply позволяет оперативно извлекать информацию о направлении и силе воздушных потоков на момент спутниковой съемки, что необходимо для идентификации типа наблюдаемого ветра (бора, верховик, култук). Особое внимание уделяется анализу барических градиентов над акваторией и прилегающими хребтами, так как именно разность давления определяет интенсивность стоковых процессов в районе Малого моря.

Параллельно осуществляется обработка радиолокационных изображений Sentinel -1 GRD, которая заключается в радиометрической калибровке и переводе цифровых значений пикселей в значения удельного эффективного сечения рассеяния. Это позволяет визуализировать зоны повышенной шероховатости водной поверхности, которые напрямую соответствуют участкам с высокой скоростью ветра. Важным этапом является подавление спекл -шума с применением адаптивных фильтров, что необходимо для получения однородной картины ветровых струй и четкой идентификации зон «ветровой тени». При анализе снимков учитывается, что яркость радиолокационного сигнала зависит не только от скорости, но и от угла между вектором ветра и направлением зондирования, поэтому данные из Raporty служат опорной сеткой для корректной интерпретации морфологии пятен.

Заключительный этап методики представляет собой синтез подготовленных данных, при котором на текстуру радиолокационного изображения накладываются векторы ветра, полученные из Raporty. Важной технической деталью является процедура пространственного совмещения, при которой данные реанализа интерполируются на сетку спутникового снимка с учетом береговой линии. Такой синтез позволяет выявить мезомасштабные неоднородности, которые не учитываются грубой сеткой реанализа, такие как узкие «факелы» боры, выходящие из Сарминского ущелья, или зоны локального ускорения ветра в проливах Ольхонские ворота. Итоговая интерпретация результатов проводится с привлечением данных наземных метеостанций, что обеспечивает тройной контроль достоверности: макромасштабный со стороны реанализа, мезомасштабный со стороны спутникового зондирования и локальный со стороны контактных измерений.

3. Анализ пространственной изменчивости ветровых полей на Байкале по данным спутникового зондирования и реанализа

3.1 Типизация метеорологических ситуаций и синоптических условий

Практическое исследование пространственной изменчивости ветровых полей в районе Малого моря проводилось на основе анализа выборки данных за осенне-зимние периоды 2021 и 2025 годов. Расширение временного интервала исследования позволило зафиксировать закономерности развития байкальской бора в различные фазы остывания акватории. На основе совместного анализа карт реанализа в среде Panoply и архивных данных наземных метеостанций было выделено три основных типа метеорологических ситуаций.

Первый тип метеорологических ситуаций представляет собой развитие экстремального стокового ветра, классифицируемого как Сарминская бора. Данный тип является наиболее репрезентативным для исследования, так как демонстрирует предельную степень воздействия воздушного потока на водную поверхность. В качестве опорного события для этого типа был выбран случай 12 ноября 2021 года, когда над акваторией Малого моря наблюдался шторм ураганной силы.

Согласно картам (рисунок 3.1), построенным в среде Panoply на основе данных реанализа, возникновению бора предшествует установление высокого атмосферного давления над Приморским хребтом при одновременном углублении циклонической ложбины над акваторией озера. На картах приземного давления прослеживается разница между циклонической ложбиной над Байкалом (1012 гПа) и областью высокого давления над материком (1016 гПа). Изолинии давления (изобары) располагаются перпендикулярно береговой линии, что создает идеальные условия для «переваливания» холодных воздушных масс через горные массивы.

12.11

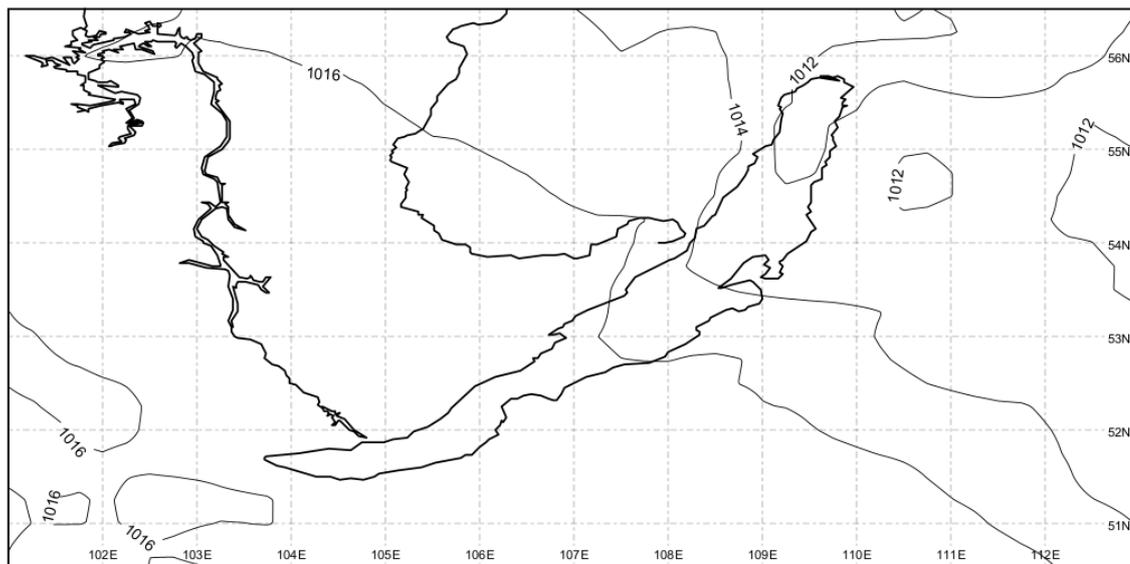


Рисунок 3.1 – Давление на уровне моря

Векторное поле в Raporty (рисунок 3.2) фиксирует ядро ветра (выделено синим цветом на картах реанализа), где скорости на высоте 10 метров достигают 8–9 м/с. Векторы ориентированы под углом 310° (северо -запад), что обеспечивает прямой навал воздуха на Ольхон.

12.11

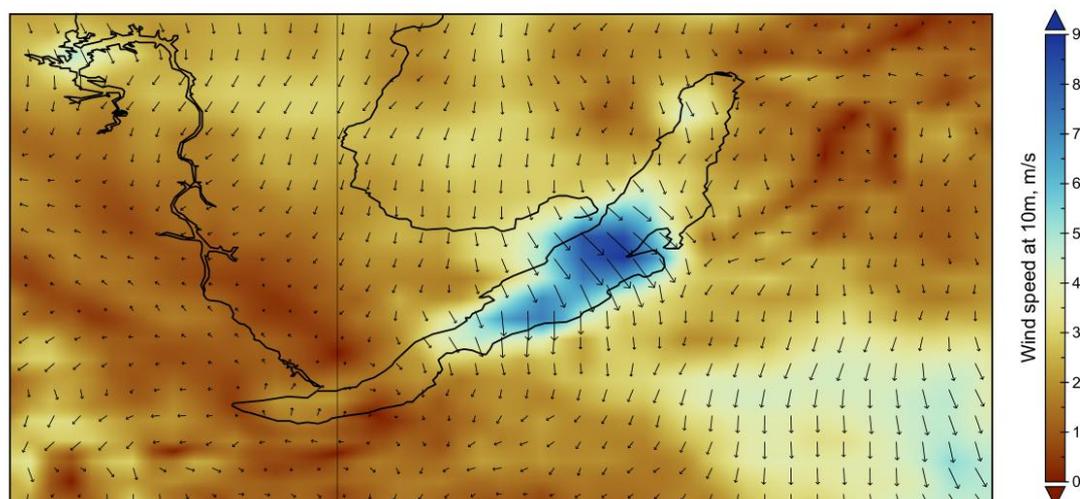


Рисунок 3.2 - Ветер на высоте 10 метров

Анализ температурной карты за 12.11.2021 (рисунок 3.3) выявляет критически важную деталь для понимания физики процесса.

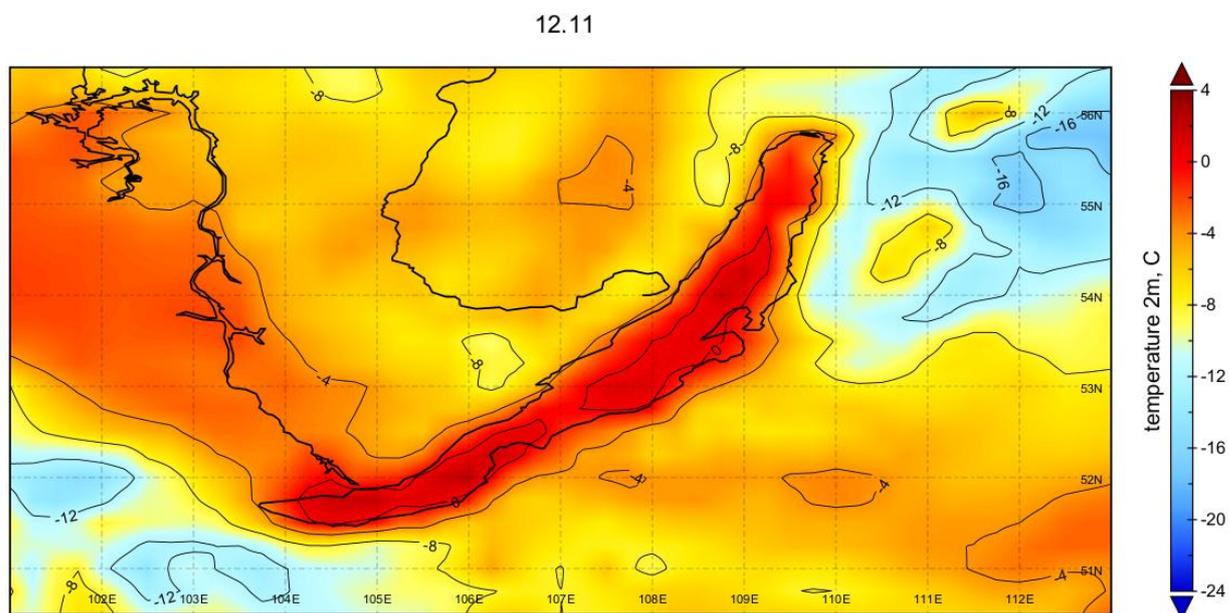


Рисунок 3.3 - Температура воздуха на высоте 2 метра

На карте температуры четко прослеживается «язык» тепла (от 0°C до -4°C), вытянутый вдоль всей акватории Байкала. При этом на суше к западу от Приморского хребта температура воздуха опускается ниже $-8... -12^{\circ}\text{C}$. Такая разница температур между холодным воздухом на суше и «теплой» воздушной подушкой над водой создает дополнительное ускорение для стокового потока. Плотный холодный воздух буквально «скатывается» в озерную котловину, вытесняя более легкий теплый воздух. В сочетании с перепадом давления, термический фактор обеспечил ураганный характер боры.

Метеостанция Хужир (таблица 3.1) в этот день зафиксировала резкое усиление ветра: если утром скорость составляла 6 м/с , то к обеду она возросла до 11 м/с , что подтверждает динамику развития шторма.

Данные метеостанции Хужир за 12.11.2021г

Время UTC	Направление	Скорость, м/с	Порыв, м/с
3:00	Ветер, дующий с запада	6	
6:00	Ветер, дующий с запада	7	
9:00	Ветер, дующий с западо -северо -запада	11	16
12:00	Ветер, дующий с западо -северо -запада	11	
15:00	Ветер, дующий с запада	8	11
18:00	Ветер, дующий с запада	7	11
21:00	Ветер, дующий с запада	8	11
00:00	Ветер, дующий с запада	5	10

Радиолокационный снимок Sentinel -1 (рисунок 3.4) визуализирует мезомасштабную «архитектуру» боры, которую Panoply отображает лишь обобщенно:

1. Морфология «Сарминского факела»: На снимке отчетливо видна веерообразная зона высокой яркости, выходящая из Сарминского ущелья. Это область максимальной шероховатости воды, где локальные скорости ветра за счет орографического ускорения значительно превышают средние модельные значения.
2. Вторичные струи: Помимо основного факела, РСА -данные выявляют серию узких ветровых струй из соседних распадков, которые сливаются в единый штормовой фронт.
3. Взаимодействие с островом: Спутник фиксирует, как остров Ольхон разбивает поток. Визуализируется зона «толчеи» (экстремального волнения) у мысов и область аэродинамической тени с подветренной

стороны острова, что полностью отсутствует на сглаженных картах Panoply.

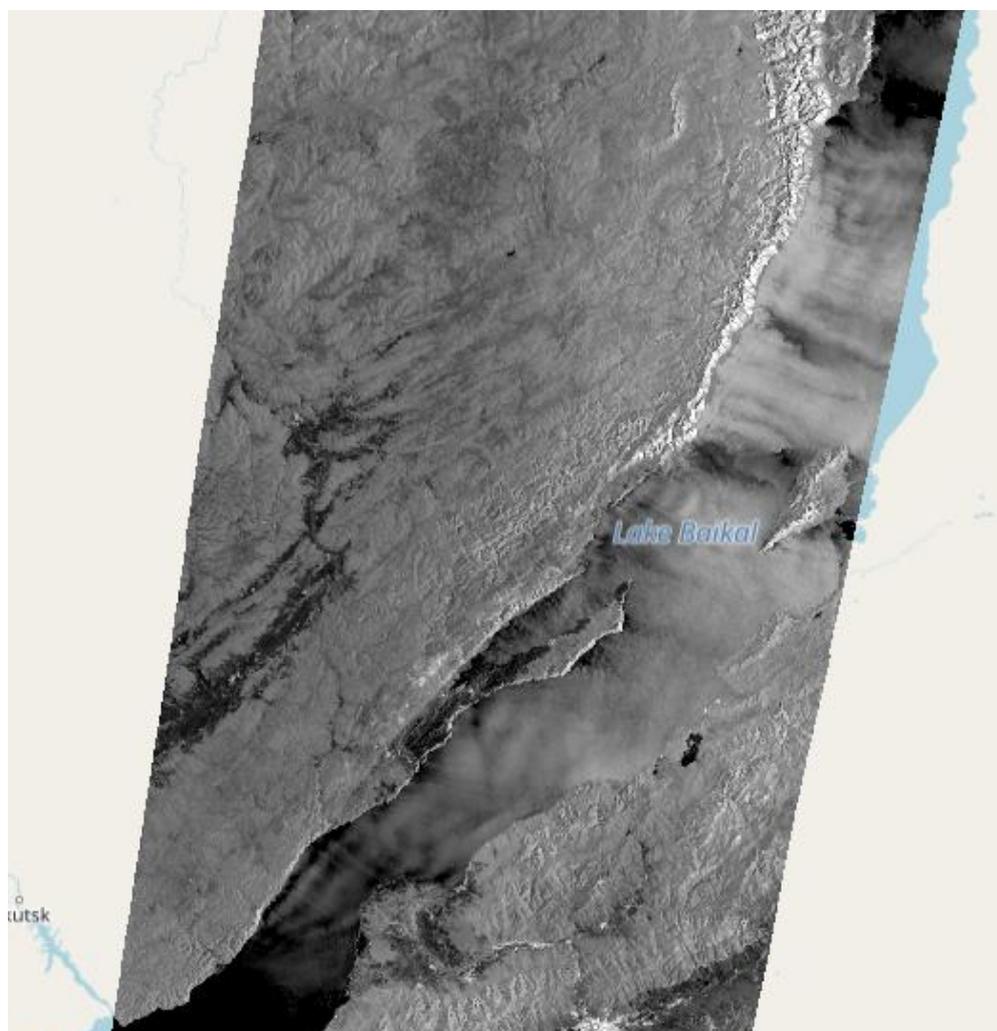


Рисунок 3.4 - радиолокационный снимок Sentinel -1

Анализ случая 12.11.2021 доказывает, что первый тип ситуаций характеризуется полным доминированием стоковых процессов. Сопоставление данных подтверждает: Panoply верно указывает на область локализации шторма, но только РСА -данные позволяют определить реальные границы «факелов» и зон затишья, обеспечивая необходимую детализацию для навигационных целей.

Второй тип ситуаций характеризуется устойчивым, но менее интенсивным (по сравнению с первым типом) воздушным потоком, при котором решающую

роль в формировании ветровых полей начинает играть орография побережья. Анализ случая 14.10.2021 позволяет детально рассмотреть механизм формирования зон «ветровой тени» и несоответствие модельных данных реальной картине на акватории.

Согласно картам реанализа в Raporty (рисунок 3.5), синоптическая ситуация 14.10.2021 определялась мощным антициклоном с давлением в центре до 1050 гПа (на западе) и областью пониженного давления (1038–1042 гПа) над восточной частью озера.

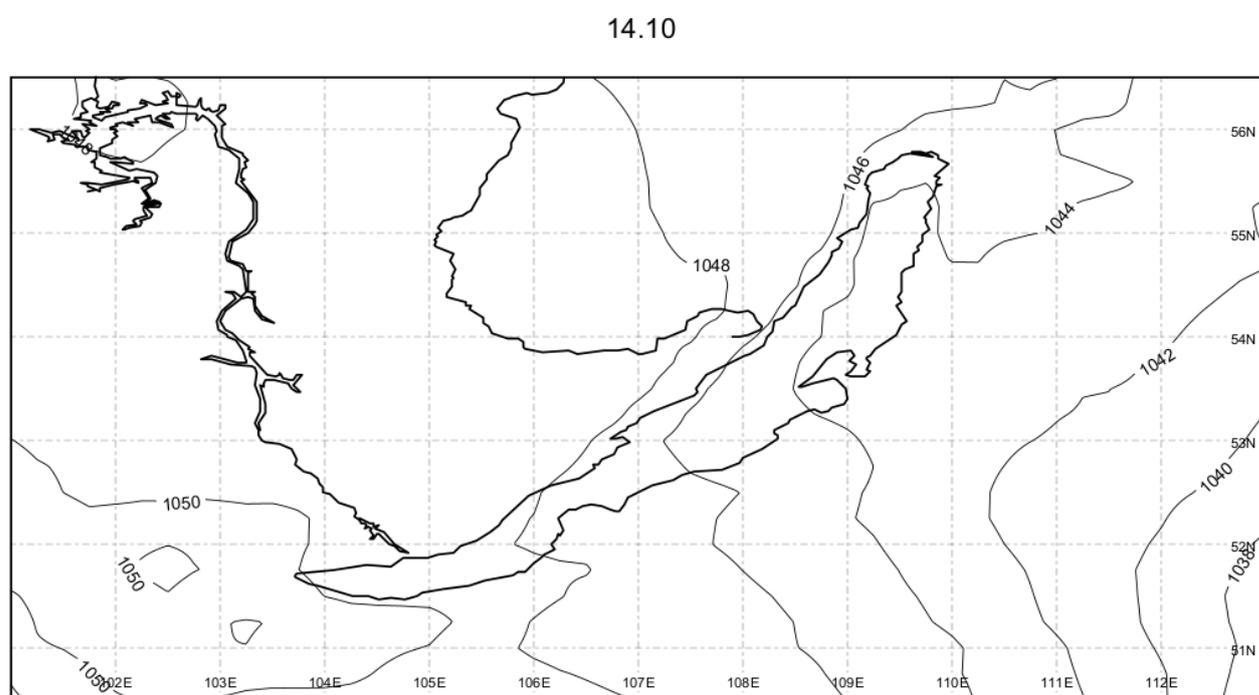


Рисунок 3.5 – Давление на уровне моря

Поле ветра (рисунок 3.6) в Raporty демонстрирует умеренно -интенсивный поток, где ядро скорости (выделено синим) локализовано над центральной частью Байкала со значениями 12–14 м/с.

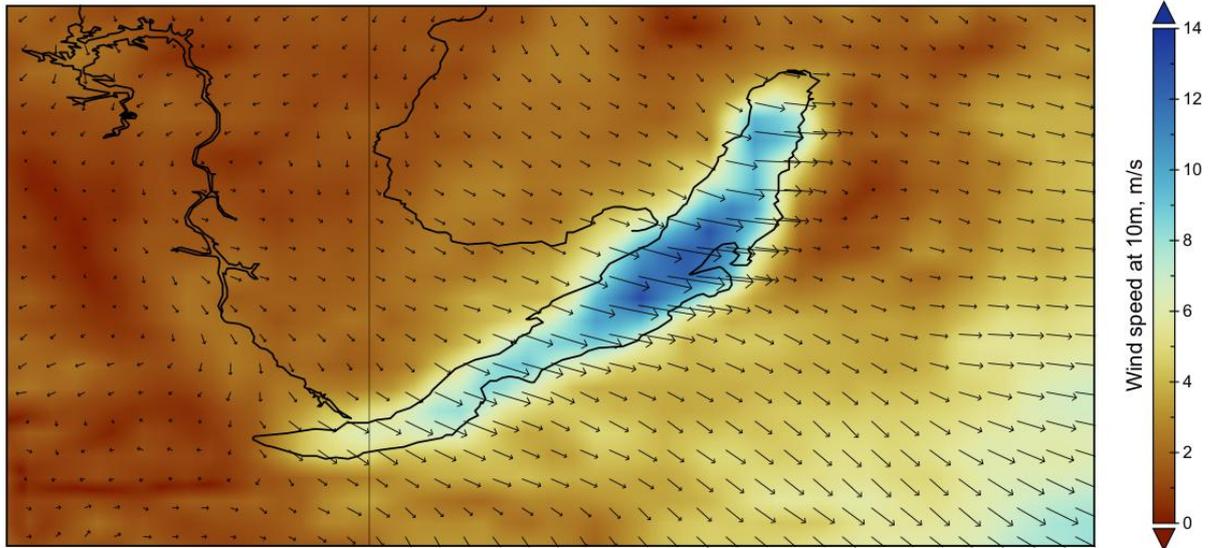


Рисунок 3.6 - Ветер на высоте 10 метров

Направление векторов - строго западное и северо -западное, что теоретически должно приводить к равномерному волнению в проливе Малое Море.

Карта температуры на высоте 2 м в Раноrly (рисунок 3.7) фиксирует наличие «теплового купола» над незамерзшей водой Байкала (температуры около $-4... -8^{\circ}\text{C}$), в то время как над горными массивами воздух значительно холоднее. Такая разница температур способствует поддержанию стабильности нижнего слоя атмосферы. Относительно теплый воздух над водой препятствует немедленному опусканию ветровых струй, переваливающих через хребет, что создает идеальные условия для формирования зон затишья у берега.

14.10

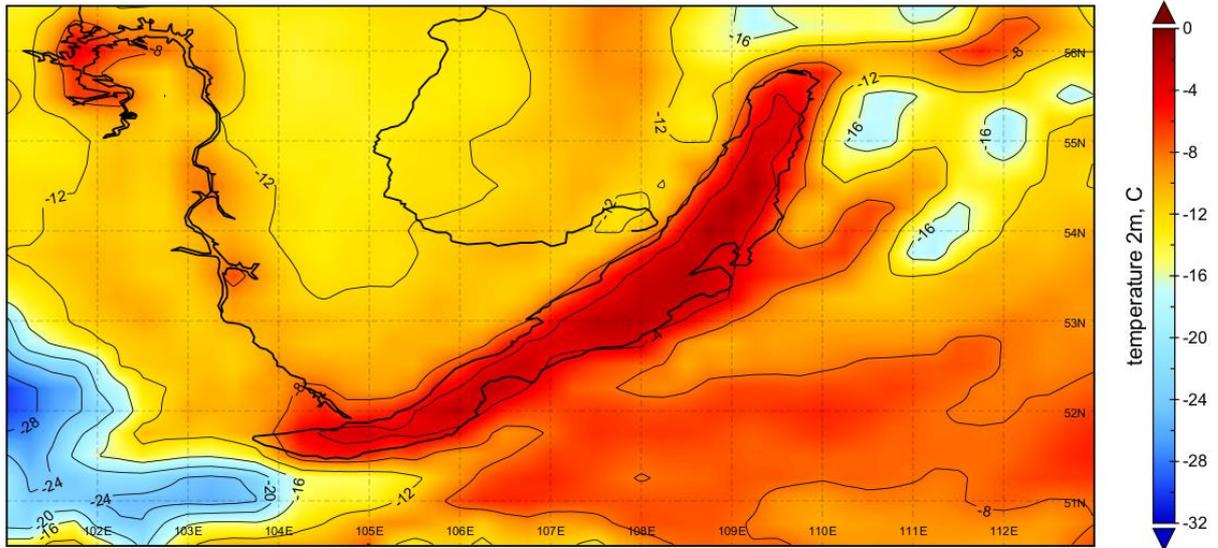


Рисунок 3.7 - Температура воздуха на высоте 2 метра

Наземные данные за 14.10.2021 (таблица 3.2) подтверждают наличие порывистого ветра, однако его динамика отличается от штормового первого типа.

Таблица 3.2

Данные метеостанции Хужир за 14.10.2021г

Время UTC	Направление	Скорость, м/с	Порыв, м/с
3:00	Северо-запад	10	
6:00	Север	4	
9:00	Северо -северо -запад	9	14
12:00	Северо -северо -запад	13	23
15:00	Северо -северо -запад	13	23
18:00	Запад -северо -запад	14	18
21:00	Запад -северо -запад	9	15
00:00	Запад -северо -запад	9	13

В период с 12:00 по 15:00 UTC зафиксирована максимальная скорость ветра - 13 м/с с порывами до 23 м/с. Направление ветра - северо -северо - западное, что указывает на активную фазу стокового процесса.

Несмотря на высокие порывы на метеостанции, РСА -снимок от 14.10.2021 (рисунок 3.8) выявляет ключевую особенность этого типа. На снимке отчетливо видны обширные темные участки вдоль западного берега Малого моря. Это зоны аэродинамической тени, образующиеся за Приморским хребтом. При данных барических условиях поток «перепрыгивает» прибрежную часть акватории, не вызывая там шероховатости поверхности.

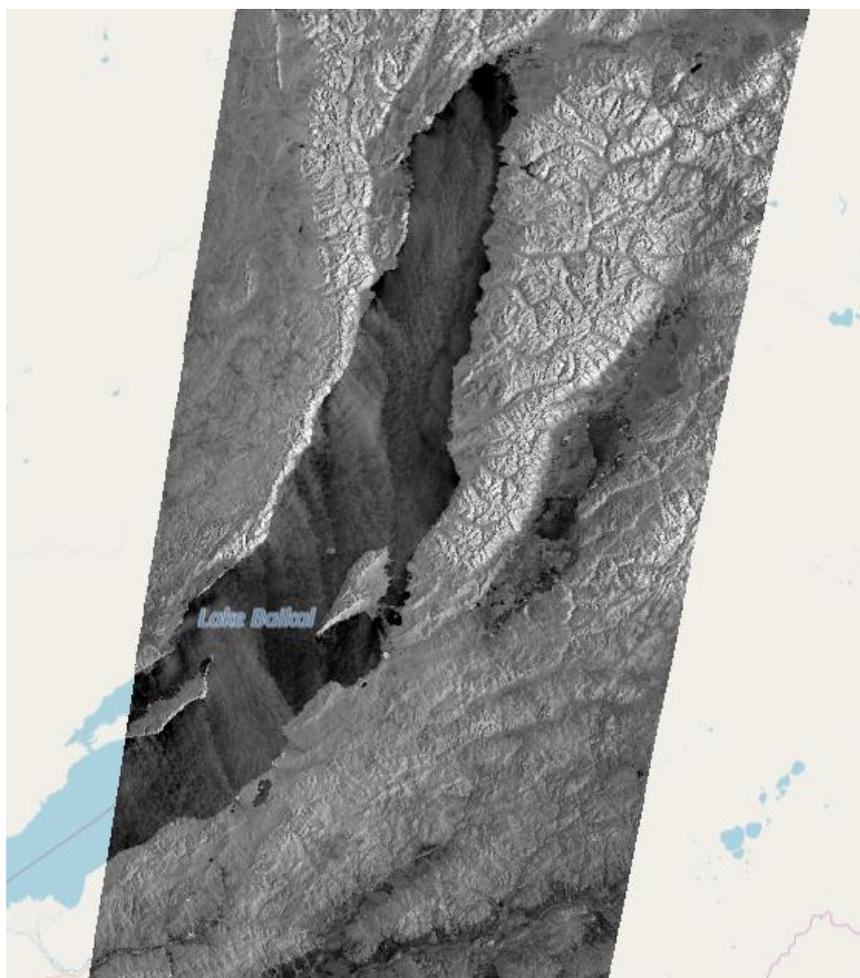


Рисунок 3.8 - радиолокационный снимок Sentinel -1

На расстоянии нескольких километров от берега на снимке наблюдается резкий переход к светлому тону - это область, где ветер опускается к воде, и его скорость (согласно яркости сигнала) начинает соответствовать порывам, зафиксированным на метеостанции.

В отличие от сплошного синего пятна в Panoply, спутник показывает, что акватория разделена на «тихие» и «штормовые» участки, что критически важно для безопасности маломерного флота.

Случай 14.10.2021 доказывает, что при северо-западном ветре умеренной силы реанализ в Panoply склонен переоценивать ветровую нагрузку непосредственно у берега. Использование данных Sentinel-1 позволяет точно картографировать границы «ветровых теней», которые защищают прибрежную зону, несмотря на штормовые порывы (до 23 м/с) на удалении от хребта.

Третий тип метеорологических ситуаций характеризует условия глубокой осени и начала зимы (предледостав), когда ключевым фактором формирования волнового режима становится резкая термическая неустойчивость атмосферы. Случай 13.12.2021 наглядно демонстрирует, как температурный градиент между водой и воздухом усиливает радиолокационный отклик даже при средних скоростях ветра.

Анализ полей реанализа выявляет специфические условия арктического вторжения. Карта давления (рисунок 3.9) показывает градиент между антициклоном на северо-западе (1032 гПа) и ложбиной над восточным берегом (1020 гПа). Это создает условия для устойчивого притока холодного воздуха.

13.12

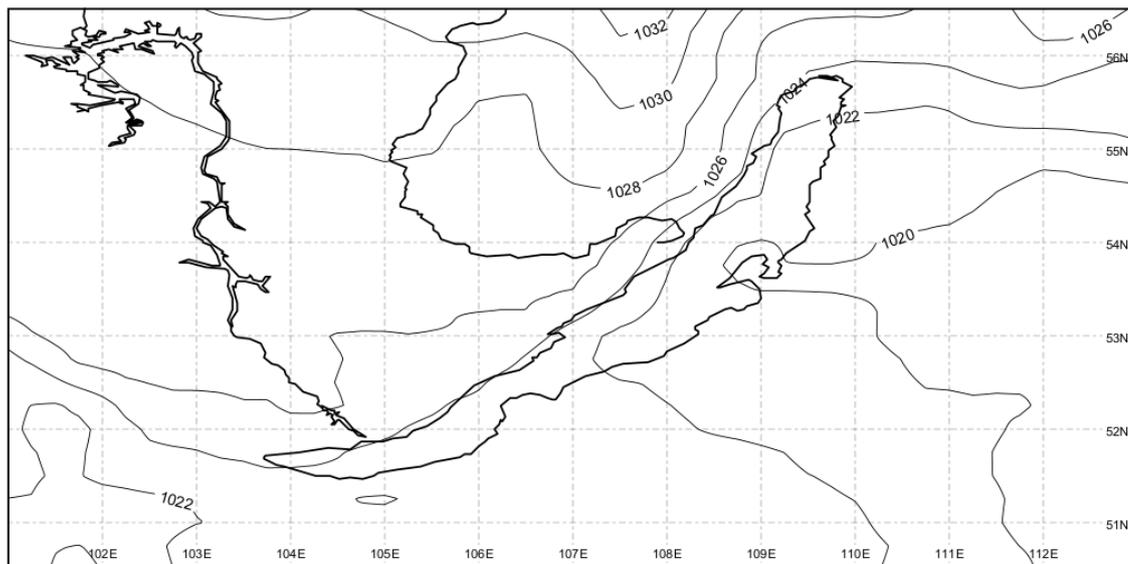


Рисунок 3.9 – Давление на уровне моря

На карте скоростей (рисунок 3.10) зафиксировано «ядро» умеренного ветра над Малым Морем со значениями 7–9 м/с (выделено синим цветом), с векторами северо-западного направления.

13.12

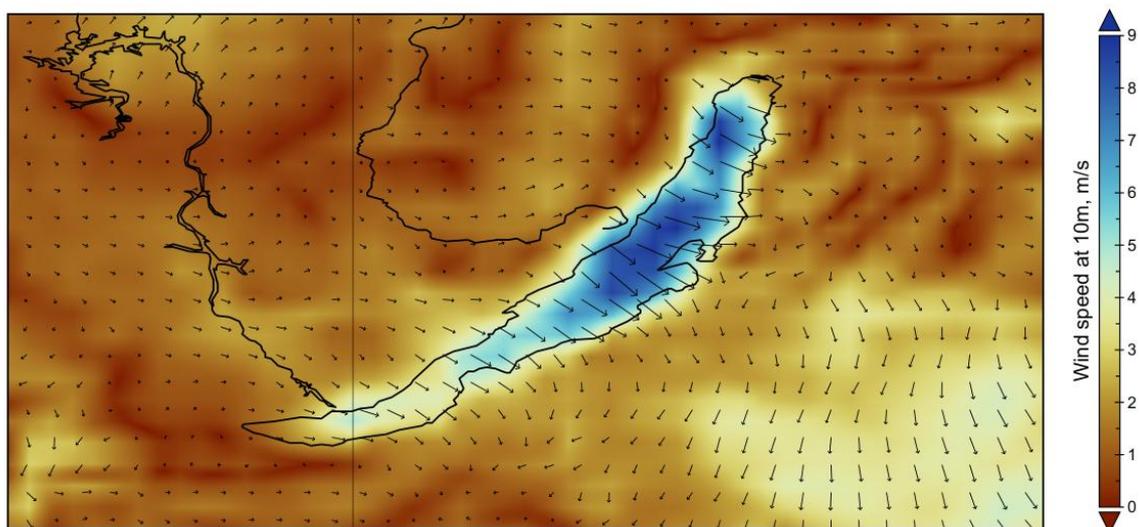


Рисунок 3.10 - Ветер на высоте 10 метров

Температурная карта Raporty (рисунок 3.11) фиксирует экстремальное выхолаживание воздуха над сушей до -30 -34°C , в то время как над акваторией температура держится в диапазоне -10 -14°C . Разница температур в 20°C на коротком расстоянии провоцирует мощную конвекцию.

13.12

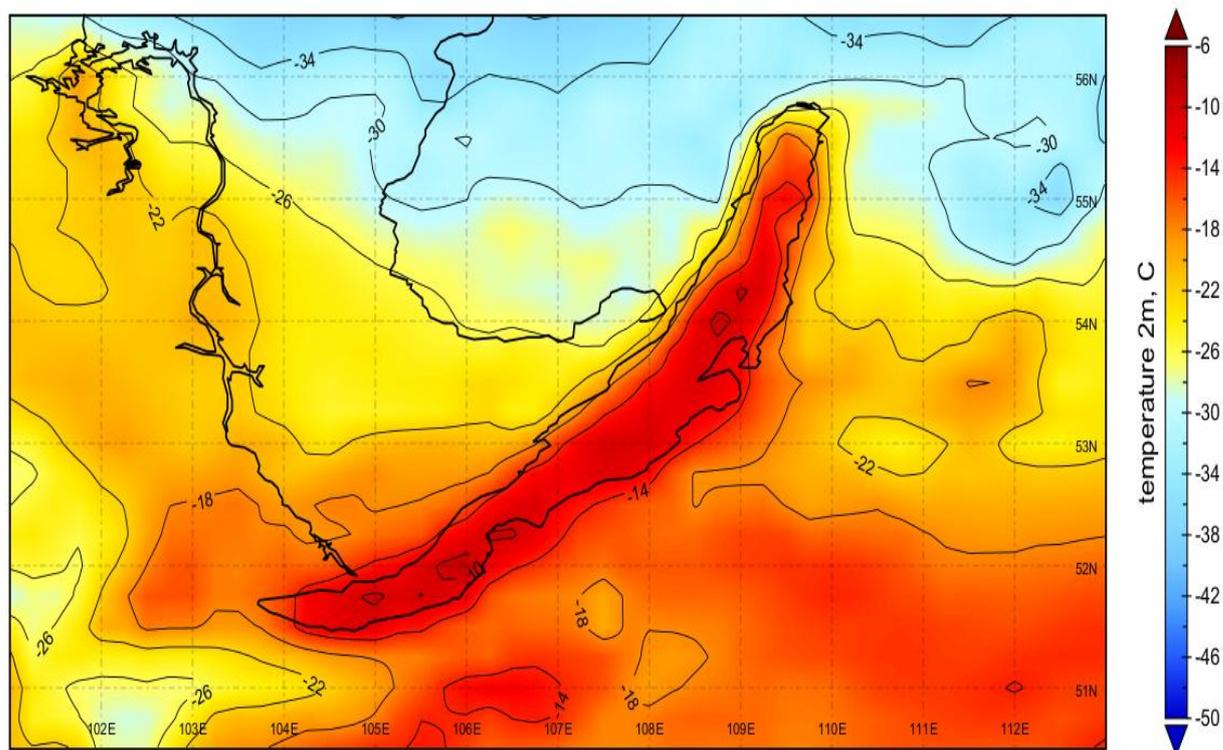


Рисунок 3.11 - Температура воздуха на высоте 2 метра

Данные станции (таблица 3.3) подтверждают порывистый характер ветра в день пролета спутника. В 15:00 UTC зафиксирована максимальная скорость 10 м/с с порывами до 15 м/с. Направление ветра - северо-северо-западное, что соответствует вектору стока из долин Приморского хребта.

Данные метеостанции Хужир за 13.12.2021г

Время UTC	Направление	Скорость, м/с	Порыв, м/с
3:00	Запад	5	10
6:00	Запад-северо-запад	8	11
9:00	Северо -запад	7	11
12:00	Северо -запад	6	10
15:00	Северо-северо-запад	10	15
18:00	Запад-северо-запад	4	
21:00	Северо -запад	4	
00:00	Юго-юго-восток	2	

Радиолокационный -снимок от 13.12.2021 (рисунок 3.12) демонстрирует уникальную морфологию, отличную от чисто ветровых штормов. Поверхность воды на снимке выглядит равномерно яркой, но с характерной зернистой текстурой. Это результат термической дестабилизации: холодный воздух, соприкасаясь с теплой водой, вызывает микровзрывы конвекции, создавая капиллярную рябь даже там, где ветер слабее.

В отличие от октябрьского случая (14.10.2021), здесь практически нет черных зон затишья под берегом. Огромная разность температур заставляет воздушный поток «опускаться» к воде немедленно, ликвидируя зоны «перескока».

На снимке прослеживаются диффузные полосы, ориентированные вдоль ветра, что указывает на формирование «улиц облаков» и зон интенсивного испарения.

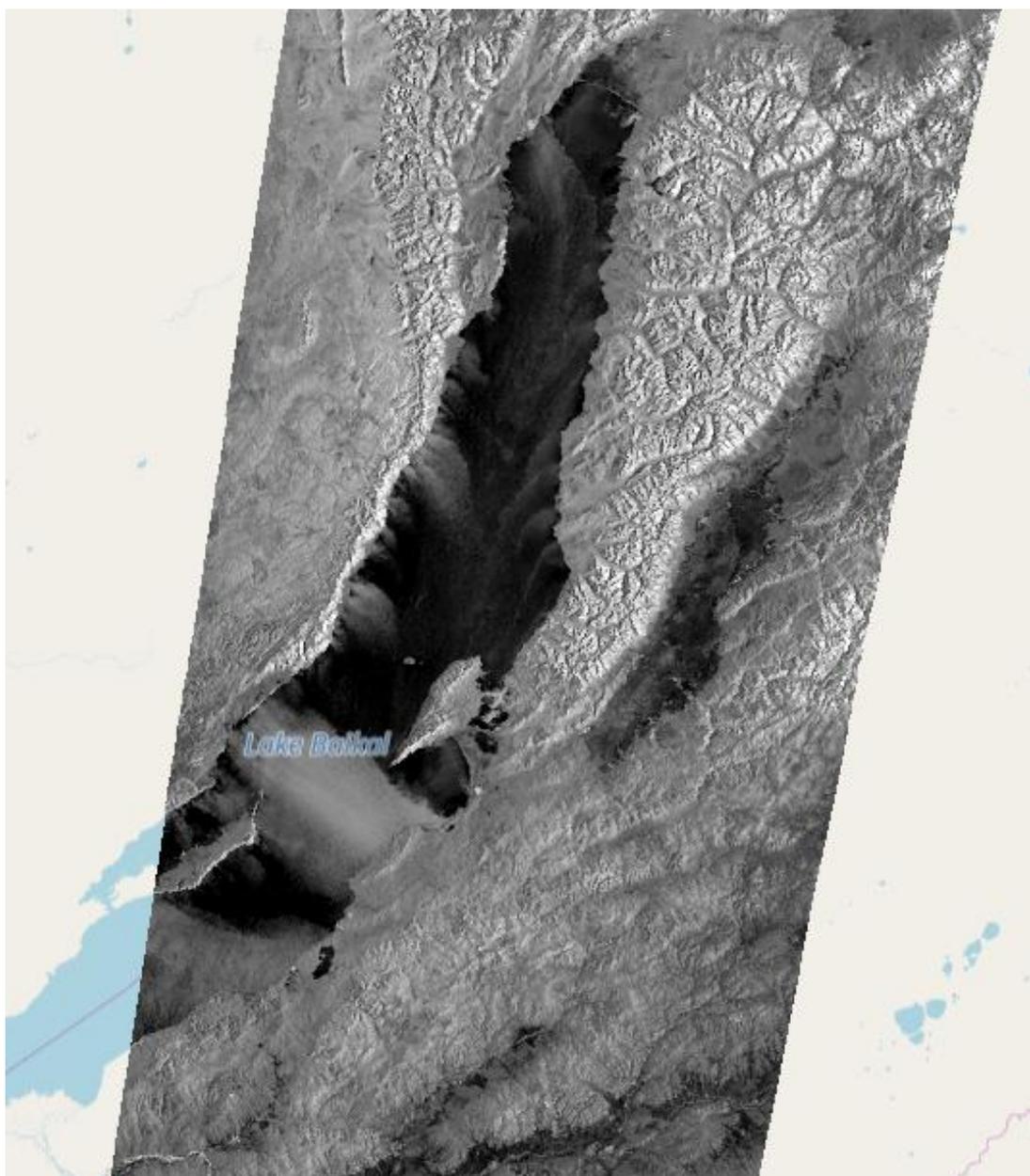


Рисунок 3.12 - радиолокационный снимок Sentinel -1

Анализ случая 13.12.2021 доказывает, что в предзимний период яркость РСА -сигнала обусловлена не только механической силой ветра (10–15 м/с), но и термическим фактором. Сопоставление с данными Raportly позволяет избежать ложной интерпретации: высокая яркость здесь - это индикатор «парения» и конвекции, а не ураганного ветра, как в случае 12.11.2021.

3.2 Детальный анализ мезомасштабной структуры интенсивной боры

Событие 15 ноября 2025 года представляет собой классический пример «струйной» Сарминской боры, когда основной энергетический потенциал ветра сосредоточен в узком коридоре, выходящем из горного ущелья.

Визуализация данных реанализа в программной среде Panoply за 15.11.2025 (рисунок 3.13) указывает на прохождение холодного атмосферного фронта. Наблюдается градиент между антициклоном (1026 гПа) и депрессией над Байкалом.

15.11

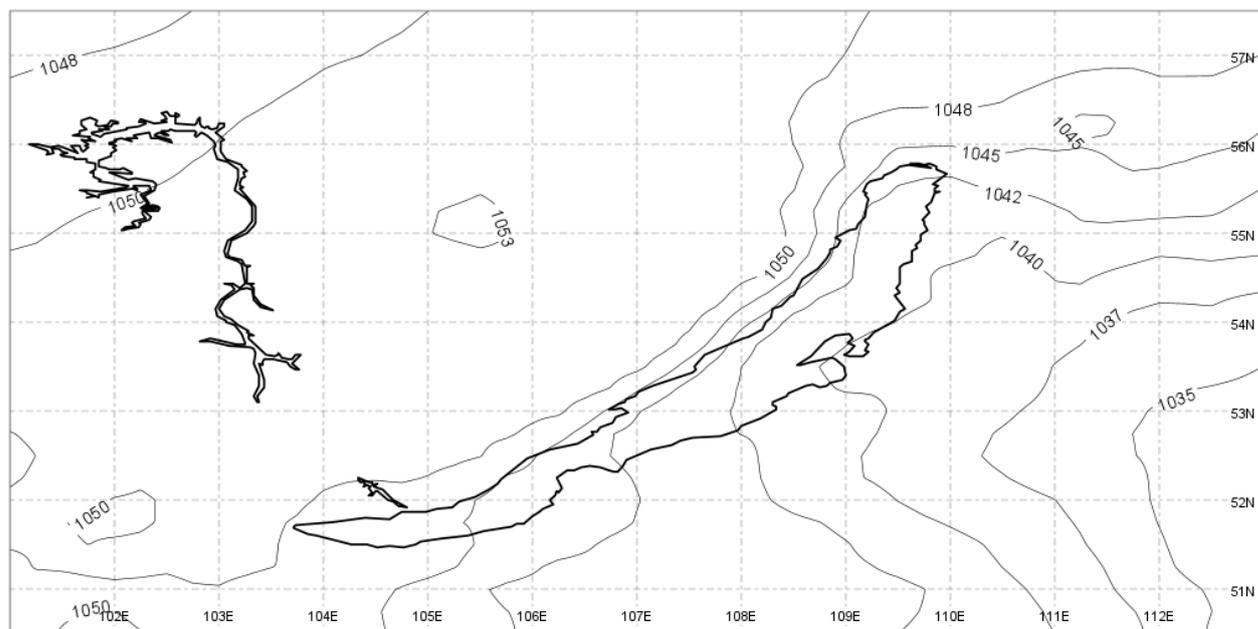


Рисунок 3.13 – Давление на уровне моря

Карта температуры на уровне 2 м (рисунок 3.14) фиксирует резкое выхолаживание материковой части до -17 -20°C . Над акваторией Малого моря сохраняется «теплое пятно» с температурой около -4 -6°C . Этот температурный контраст увеличивает плотность натекающего с гор воздуха, заставляя его с большой силой «стекать» в котловину озера.

15.11

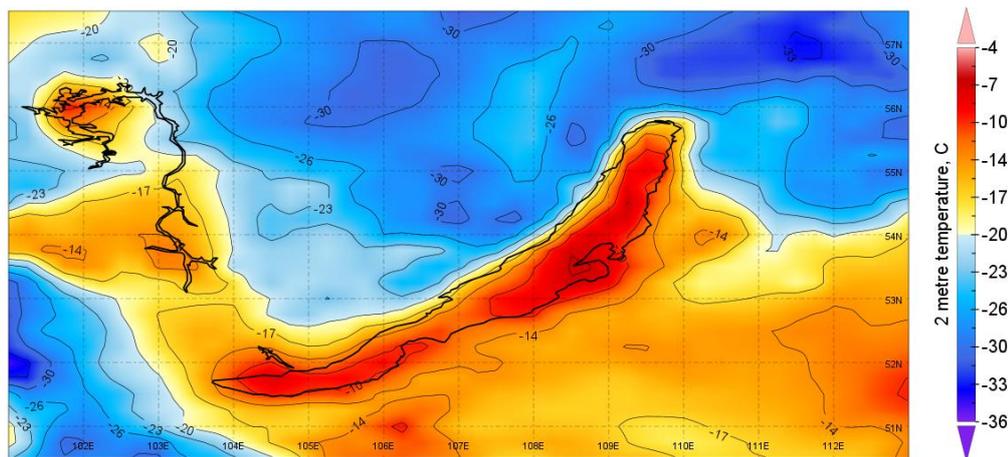


Рисунок 3.14 - Температура воздуха на высоте 2 метра

Поле приземного ветра на высоте 10 метров характеризуется как устойчивый северо-западный поток. Согласно векторной карте Raportly (рисунок 3.15), расчетная скорость ветра над акваторией Малого моря составляет 8 -12 м/с, при этом изолинии скорости распределены плавно, без локальных экстремумов вблизи ущелий. Направление векторов указывает на то, что поток должен пересекать береговую линию под прямым углом, равномерно заполняя всё пространство пролива.

15.11

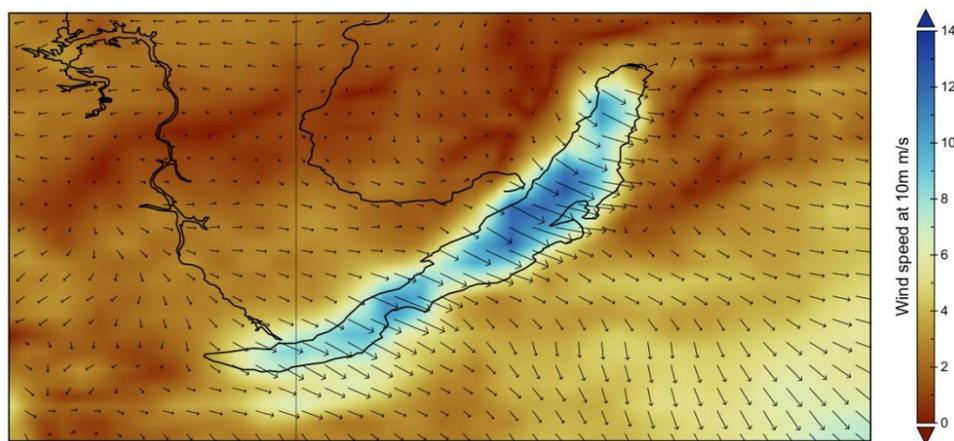


Рисунок 3.15 - Ветер на высоте 10 метров

Наземные измерения на станции Хужир подтверждают высокую порывистость воздушного потока. В период пролета спутника станция зафиксировала:

- Скорость ветра: 11 м/с.
- Максимальные порывы: 18 м/с.
- Направление: СЗ (северо -запад), что соответствует вектору выхода струи из Сарминского ущелья.

Радиолокационное изображение (рисунок 3.16), полученное практически синхронно с данными реанализа, вносит существенные коррективы в описание структуры боры.

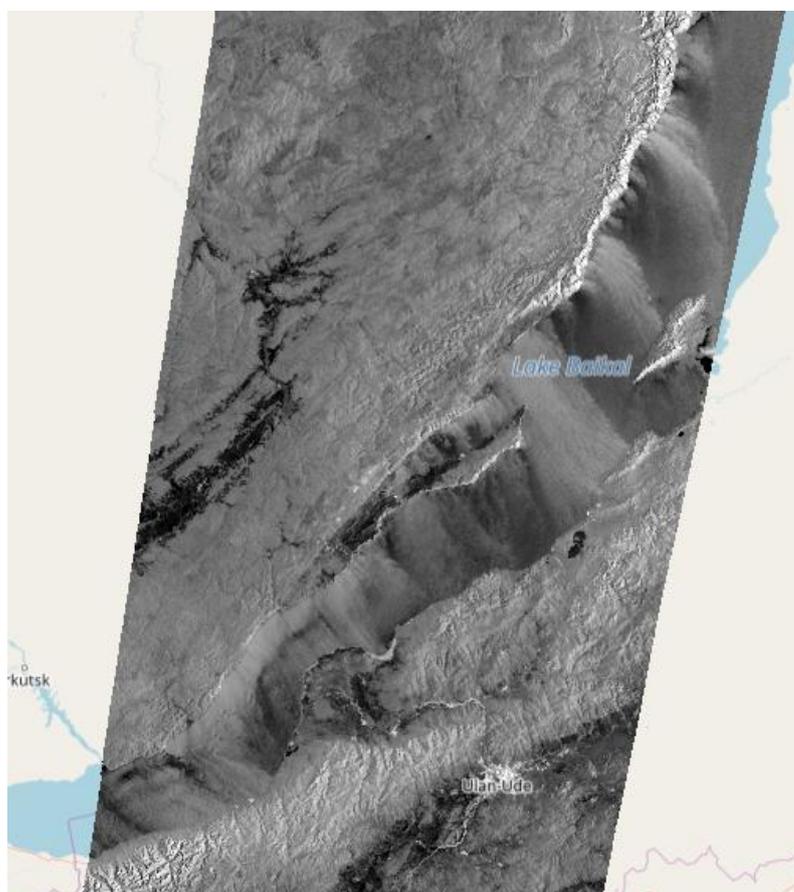


Рисунок 3.16 - радиолокационный снимок Sentinel -1

На РСА -снимке отчетливо визуализируется «Сарминский факел» - узкая, высокоинтенсивная струя ветра, вырывающаяся из долины реки Сарма. В

отличие от сглаженного поля в Raportly, спутник показывает, что основная энергия ветра сосредоточена в коридоре шириной всего 4–6 км. Это зона экстремальной шероховатости, которая «бьет» из ущелья Сармы.

Яркость РСА -сигнала в центре струи указывает на то, что реальная скорость ветра в этом узком коридоре значительно превышала модельные 9 м/с и была ближе к порывам, зафиксированным на метеостанции (18 м/с) или даже выше.

Снимок наглядно демонстрирует, что штормовое воздействие испытывает лишь ограниченный участок Малого моря. В то время как в центре «факела» наблюдается сильное волнение, соседние участки акватории остаются в относительной безопасности, что невозможно отследить без данных дистанционного зондирования.

Кейс 15.11.2025 доказывает, что для Сарминской боры характерна высокая пространственная избирательность. Использование Sentinel -1 позволяет скорректировать данные Raportly, выявляя узкие зоны максимального ветрового риска (до 18–20 м/с), которые в глобальных моделях выглядят как умеренный однородный ветер.

3.3 Исследование эффектов орографической трансформации и зон «ветровой тени»

В данном разделе рассматривается механизм взаимодействия воздушных масс с Приморским хребтом и островом Ольхон. Основное внимание уделено феномену «ветровой тени» - участкам акватории, защищенным рельефом от прямого воздействия боры, что критически важно для навигационной безопасности.

Согласно данным реанализа на 10.10.2025 (рисунок 3.17), метеорологическая ситуация определялась влиянием периферии антициклона. Изобары ориентированы таким образом, что создают устойчивый северо - западный перенос.

10.10

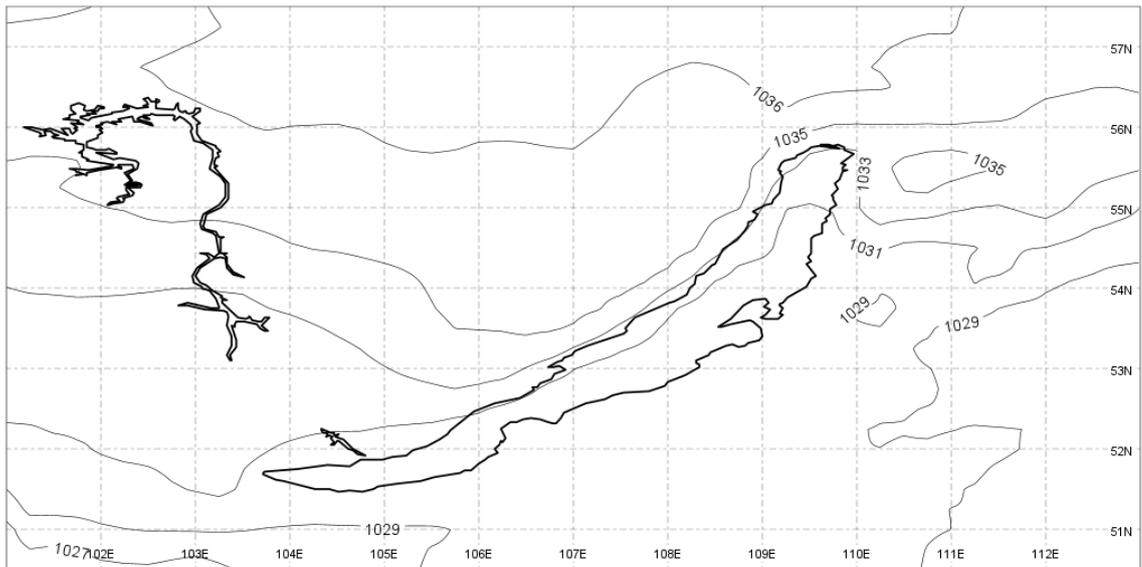


Рисунок 3.17 – Давление на уровне моря

Карта температуры на высоте 2 м в Рапорлу (рисунок 3.18) показывает умеренные значения (около 0 +2°C). Отсутствие резкого выхолаживания материка способствует сохранению стабильной стратификации атмосферы.

10.10

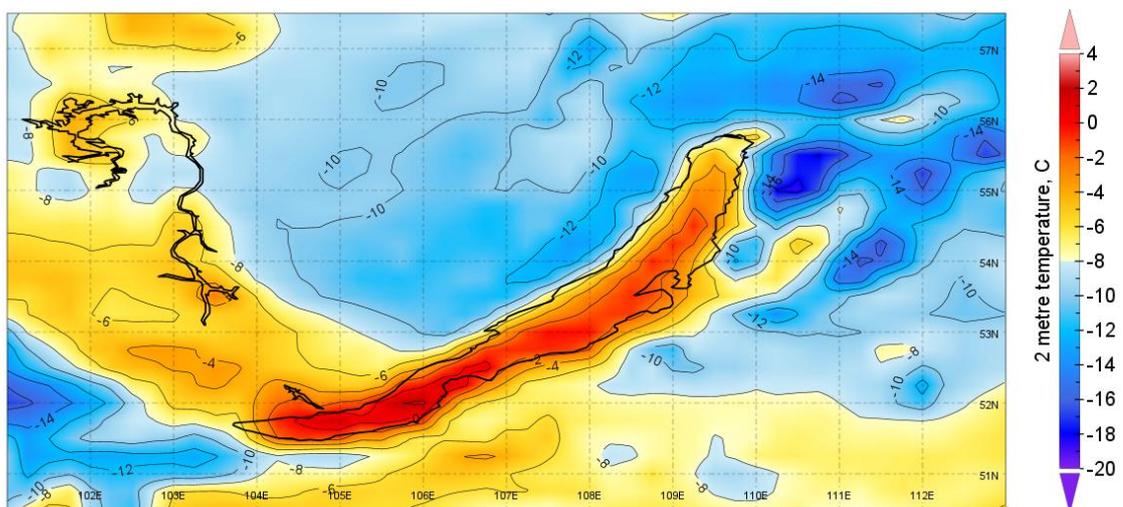


Рисунок 3.18 - Температура воздуха на высоте 2 метра

Рапорту фиксирует поле ветра (рисунок 3.19) со скоростями 7–10 м/с. На картах реанализа поток выглядит однородным и «заполняет» всё пространство пролива, не учитывая препятствия в виде гор.

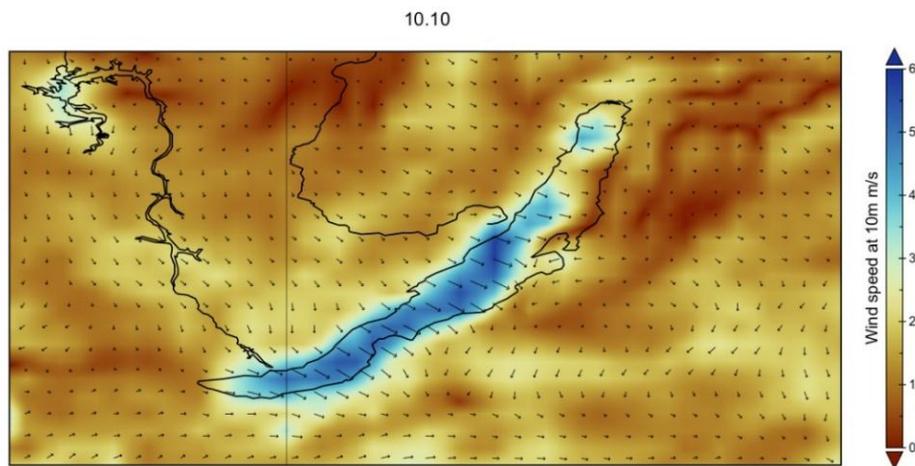


Рисунок 3.19 - Ветер на высоте 10 метров

Анализ вертикального профиля атмосферы на станции Ангарск (рисунок 3.20) за этот день подтверждает наличие слоя приземной инверсии (ниже гребня Приморского хребта).

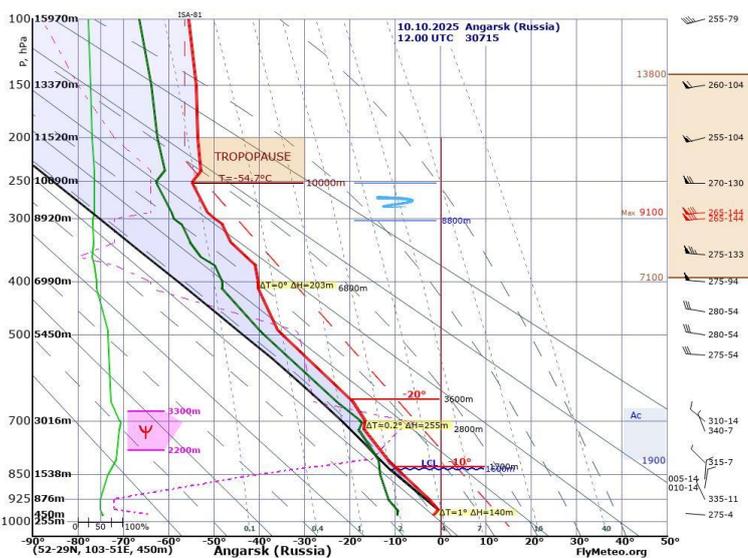


Рисунок 3.20 – Аэрологическая диаграмма за 10.10.25 на станции Ангарск

Наличие инверсии создает эффект «экранирования». Воздушный поток не может свободно опускаться вниз сразу за склоном, а «перелетает» прибрежную часть акватории, образуя зону аэродинамического затишья.

На снимке Sentinel -1 (рисунок 3.21) отчетливо визуализируются обширные зоны штиля (черные участки) непосредственно под Приморским хребтом. Ширина этой «тени» достигает 6–8 км. Это доказывает, что при данных условиях рельеф полностью блокирует ветер в прибрежной зоне.

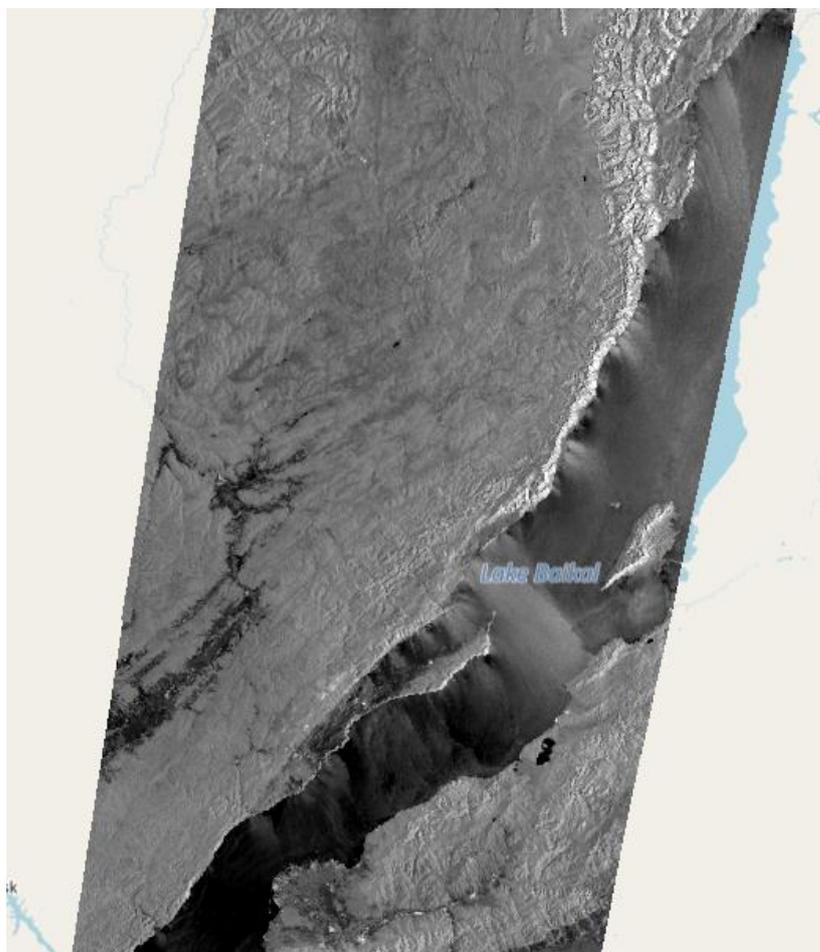


Рисунок 3.21 - радиолокационный снимок Sentinel -1

В то время как спутник видит штиль у западного берега, метеостанция Хужир (таблица 3.4) фиксирует ветер скоростью 6 м/с, а на станции Солнечная была зафиксирована скорость 9 м/с с порывами 18 м/с. На снимке видно что в районе станции самый сильный поток ветра (более светлые области снимка).

Данные метеостанции Хужир за 10.10.2025г

Время UTC	Температура, С	Направление	Скорость, м/с	Порыв, м/с
3:00	0,5	Северо-восток	4	
6:00	1,9	Восток-северо-восток	4	
9:00	1,6	Восток-северо-восток	2	
12:00	-0,3	Северо-северо-запад	4	
15:00	-2,0	Северо-северо-запад	8	12
18:00	-4,0	Восток-юго-восток	2	
21:00	-2,6	Северо-северо-запад	6	
00:00	-3,4	Северо-северо-запад	5	

С подветренной стороны самого острова Ольхон (в сторону Большого Байкала) на снимке также виден длинный «шлейф» затишья, тянущийся на десятки километров, что полностью игнорируется в Raporly.

Случай подтверждает, что в условиях стабильной стратификации и умеренных скоростей ветра рельеф Приморского хребта и острова Ольхон выступает в роли мощного экрана. Модели реанализа (Raporly) не способны воспроизвести эти зоны затишья, что делает РСА -снимки Sentinel -1 единственным надежным инструментом для картографирования фактических зон ветровой нагрузки.

Если случай 10.10.25 демонстрировал стабильную и широкую «ветровую тень», то данные за 27 ноября 2025 года показывают, как сезонное снижение температуры воздуха влияет на геометрию орографических эффектов.

Согласно картам Raporly (рисунок 3.22), температура воздуха опустилась до -12 -15°C. Температура воды в Малом Море всё еще положительная (+1 +2°C). Холодный арктический воздух значительно плотнее октябрьского. Это

Детальное изучение структуры воздушного потока в этот день позволяет выявить существенные мезомасштабные неоднородности, обусловленные сочетанием синоптического градиента и термической неустойчивости.

Согласно картам реанализа (рисунок 3.24), 27.11.2025 над акваторией Малого моря наблюдалось однородное поле северо-западного ветра. Модель Raporty демонстрирует устойчивый поток со скоростями 5-6 м/с (ядра выделены равномерным голубым цветом). Направление векторов - строго северо-западное, что соответствует классической схеме затекания воздушных масс через понижения Приморского хребта. Поле выглядит сглаженным, без резких зон ускорения или затишья между материком и островом Ольхон.

27.11

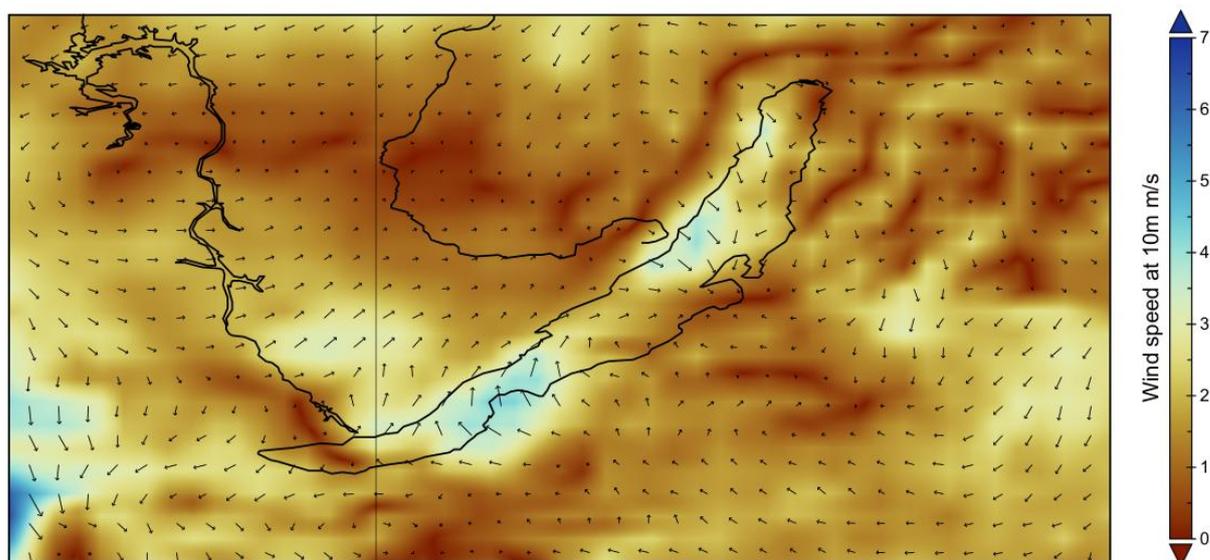


Рисунок 3.24 - Ветер на высоте 10 метров

Радиолокационное изображение (рисунок 3.25) вносит принципиальные коррективы в модельную картину, визуализируя реальную динамику потока у поверхности воды. На снимке поле ветра перестает быть однородным. Отчетливо видны «ветровые струи» (зоны повышенной яркости), выходящие из долин рек (Сарма, Курма). В этих узких коридорах реальная скорость ветра, судя по

интенсивности обратного рассеяния, значительно превышает модельные значения и достигает 15–18 м/с.

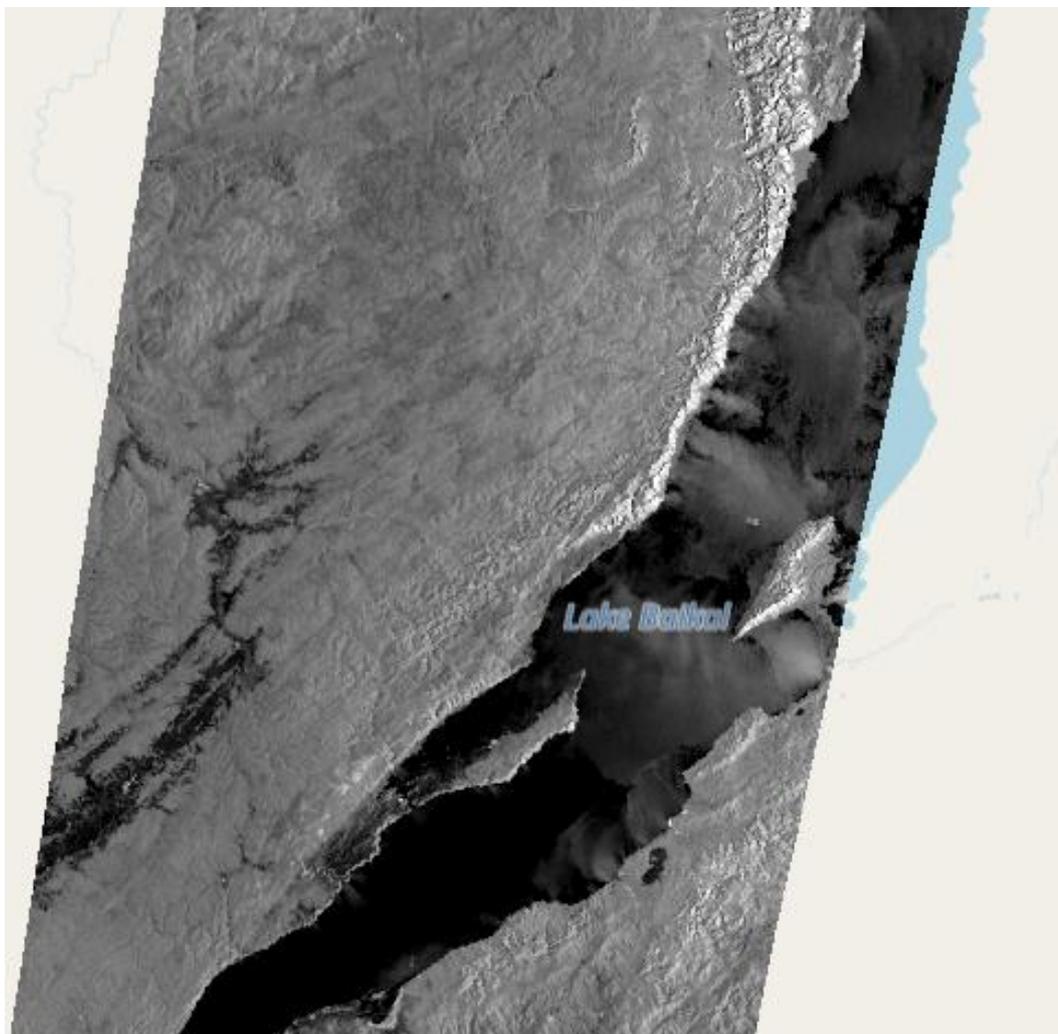


Рисунок 3.25 - радиолокационный снимок Sentinel -1

В районе северной оконечности острова Ольхон наблюдается расхождение потока. Спутник фиксирует усиление ветра на мысах и резкое ослабление в небольших бухтах, что полностью игнорируется сеткой реанализа Panoply. Также на снимке прослеживаются длинные светлые линии, вытянутые вдоль направления ветра. Это «улицы ветра», указывающие на высокую турбулентность потока в условиях, когда холодный воздух (-12°C) проходит над относительно теплой водой. Эти структуры свидетельствуют о том, что ветер не

просто дует горизонтально, а постоянно «бьет» в поверхность воды нисходящими порывами.

Данные метеостанции Хужир за 27.11.2025 подтверждают спутниковую картину: во время пролета спутника на станции фиксировалась скорость 2 м/с, в то время как на станции Солнечная ветер был 4м/с с порывами до 11 м/с. Это доказывает, что поле ветра в конце ноября носит выраженный пульсирующий характер, который Panoply усредняет, а Sentinel -1 визуализирует через текстуру шероховатости.

В отличие от октябрьского случая, где «тень» под Приморским хребтом достигала 8 км, 27.11.2025 зона черного цвета (штиля) значительно уже - около 3–4 км. Холодный плотный поток «обрушивается» на воду гораздо ближе к берегу. На снимке за 27.11 отчетливо видны «ячейки» и полосы, что говорит о высокой турбулентности. В октябре граница тени была ровной, а здесь она «рваная» из-за термической неустойчивости (холодный воздух над теплой водой). Тень за островом Ольхон также стала короче, но ярче выражена по контрасту. Это подтверждает, что в конце ноября «ветровые тени» перестают быть надежным убежищем для судов на большом удалении от берега.

3.4 Особенности радиолокационной визуализации в условиях термической неустойчивости

В данном разделе исследуется специфика интерпретации спутниковых данных в периоды, когда разница температур воды и воздуха становится ключевым фактором формирования микрорельефа водной поверхности. Исследование показало, что интенсивность радиолокационного сигнала на акватории Байкала в предзимний период может быть обусловлена не только кинетической энергией ветра, но и процессами термической дестабилизации пограничного слоя атмосферы

Согласно картам реанализа (рисунок 3.26), акватория Байкала находилась в поле повышенного давления (размытый антициклон). Изобары на карте

давления распределены редко, что указывает на крайне малые барические градиенты. В такой синоптической ситуации возникновение штормового или ураганного ветра физически невозможно.

03.11

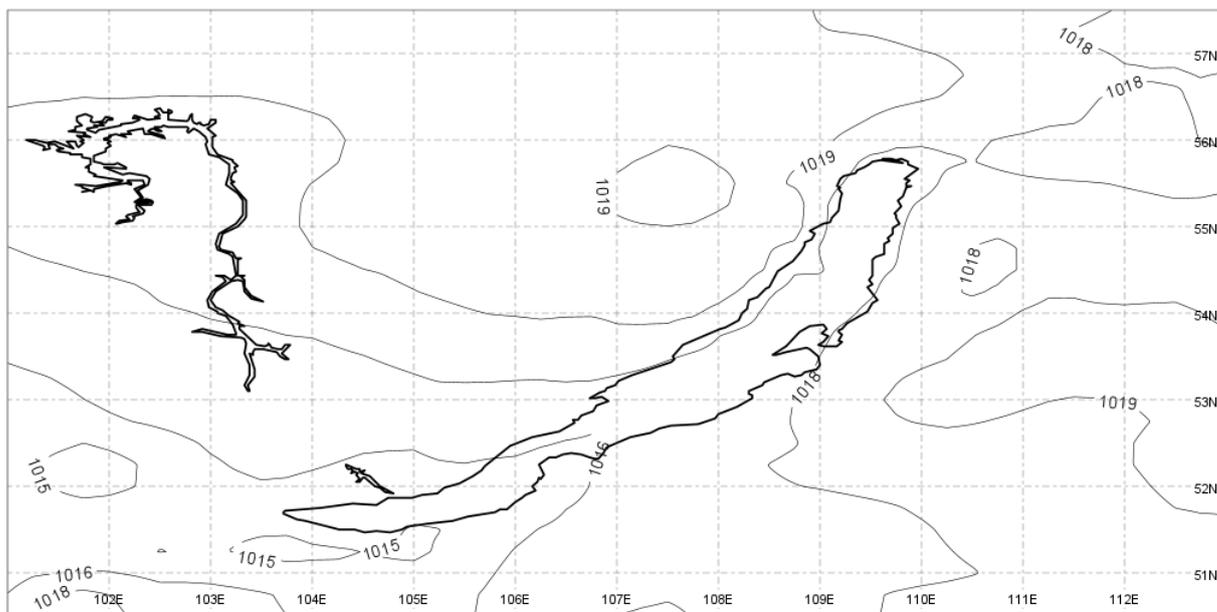


Рисунок 3.26 – Давление на уровне моря

На основе данных реанализа температуры (рисунок 3.27) и наземных измерений за 3 ноября 2025 года температура воздуха над побережьем опустилась до -6 -9°C , в то время как температура водной поверхности Малого моря оставалась положительной ($+4$ $+5^{\circ}\text{C}$). Возникающий контраст в 10 – 14 градусов является достаточным для запуска интенсивных конвективных процессов.

03.11

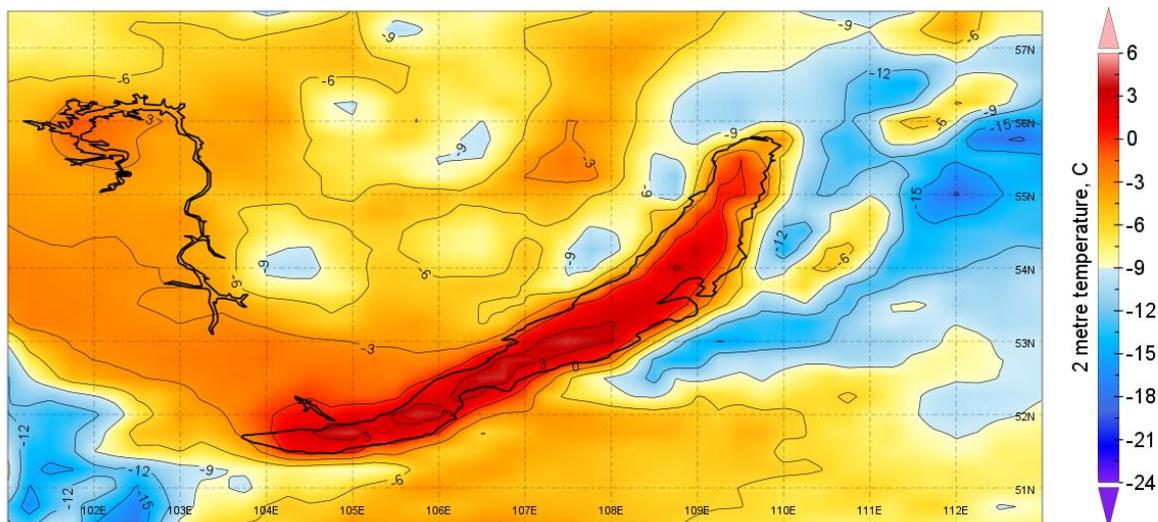


Рисунок 3.27 - Температура воздуха на высоте 2 метра

Данные реанализа в Raporty (рисунок 3.28) для этого срока демонстрируют умеренное поле ветра со скоростями 3–5 м/с. Эти значения подтверждаются фактическими данными метеостанции Хужир (3 м/с). Таким образом, синоптическая ситуация характеризовалась отсутствием штормовой нагрузки.

03.11

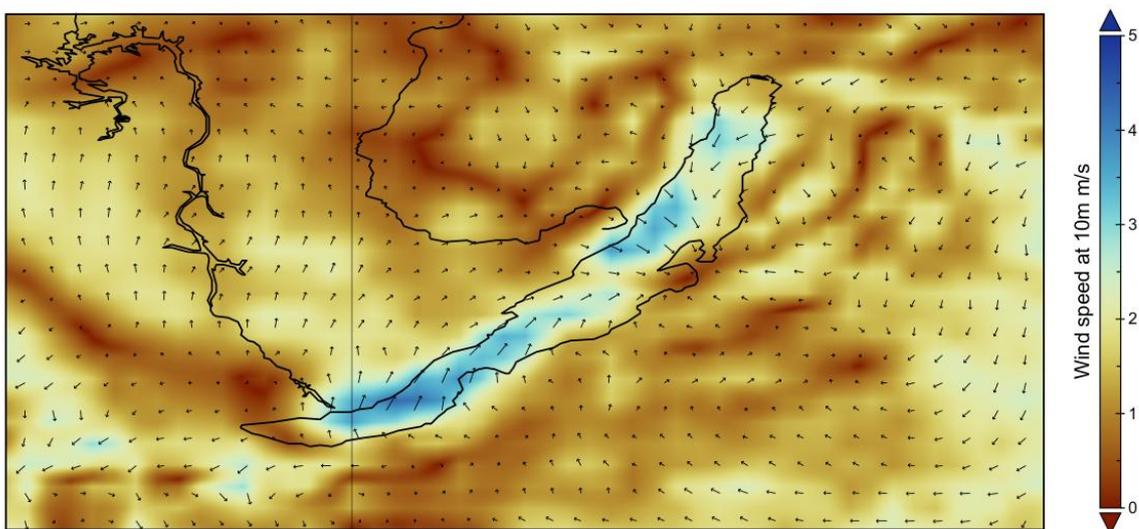


Рисунок 3.28 - Ветер на высоте 10 метров

Несмотря на слабые скорости ветра, зафиксированные контактными методами и моделью, спутниковое изображение Sentinel -1 (рисунок 3.29) демонстрирует аномально высокую яркость обратного рассеяния по всей акватории пролива.

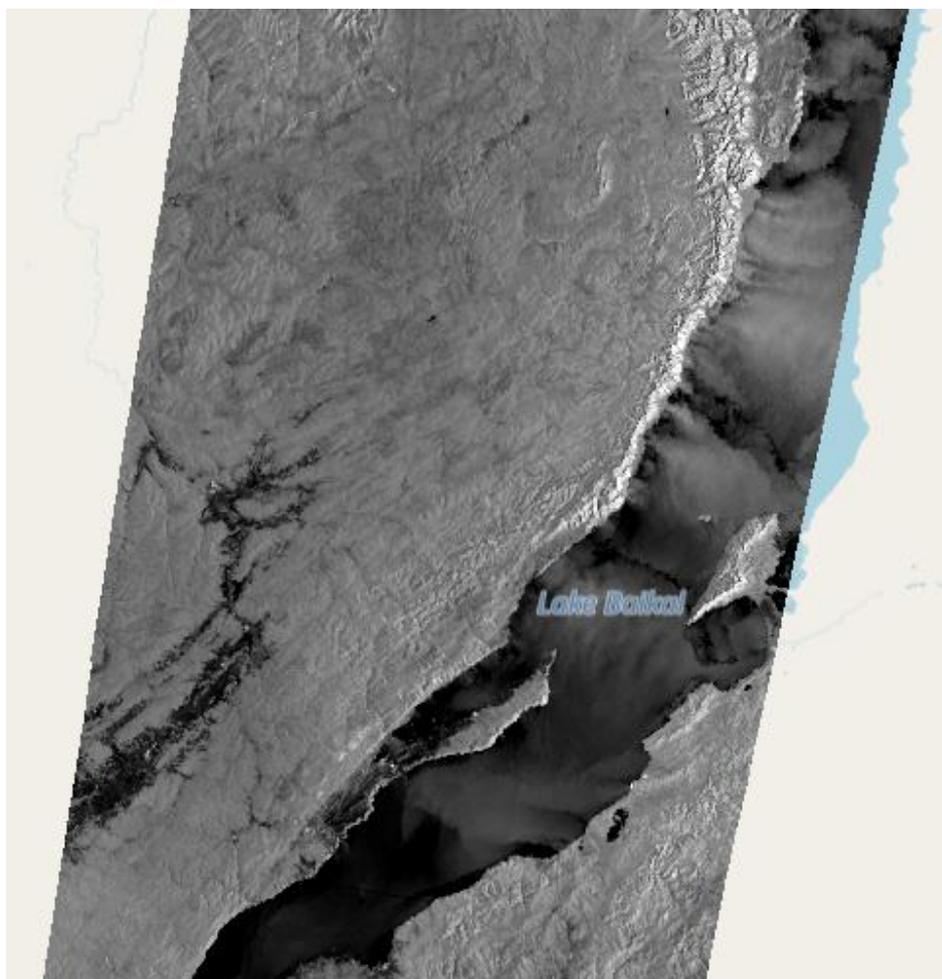


Рисунок 3.29 - радиолокационный снимок Sentinel -1

При натекании холодного воздуха на теплую воду происходит интенсивное «парение» озера. Восходящие потоки создают мелкомасштабную хаотичную рябь (капиллярные волны), которую радар фиксирует как зону сильного волнения.

На снимке за 03.11.2025 визуализируется специфическая «ячеистая» структура. В отличие от ветровых струй, имеющих четкую направленность, термическая конвекция создает диффузное, «зернистое» поле яркости.

Использование только данных дистанционного зондирования в данной ситуации привело бы к ошибочной идентификации штормового ветра скоростью 15–18 м/с, что опровергается данными реанализа ветра и наземных станций.

Кейс 03.11.2025 подтверждает, что в условиях термической неустойчивости радиолокационные данные требуют обязательной кросс - верификации.

Совместный анализ барического поля (отсутствие градиентов) и текстуры РСА -снимка позволяет безошибочно идентифицировать ложные сигналы. Это доказывает, что реанализ в Reanalysis необходим для понимания физической возможности ветра, а Sentinel -1 - для оценки состояния поверхности, которое в преддверии может не соответствовать реальной ветровой нагрузке.

Заключение

В ходе выполнения данной работы было проведено комплексное исследование пространственно -временной изменчивости ветровых полей акватории Малого моря. Использование синергетического подхода, объединяющего прецизионные данные спутниковой радиолокации Sentinel -1, глобальный метеорологический реанализ ERA5 (Panoply) и верификацию по наземным метеостанциям, позволило сформулировать следующие основные выводы.

Сравнительный анализ показал превосходство спутниковой радиолокации над традиционными методами в условиях пересеченного рельефа Малого моря:

- **Переход от точечного к площадному анализу:** В отличие от редкой сети наземных станций, фиксирующих ветер в одной точке, данные Sentinel -1 обеспечили сплошное покрытие акватории. Это позволило выявить мезомасштабные потоки, которые полностью игнорируются стандартной метеосетью.
- **Визуализация микро -орографических эффектов:** Высокое разрешение РСА -снимков подтвердило уникальную чувствительность метода к мелкой шероховатости воды. Это дало возможность детально картировать зоны завихрений за мысами и линии сходимости потоков, недоступные для других видов зондирования.
- **Всепогодность и надежность:** Подтверждена способность радара работать сквозь облачность и в ночное время, что критически важно для мониторинга Сарминской боры, которая часто сопровождается плотной облачностью и происходит в периоды короткого светового дня.

Радиолокационный метод признан наиболее адекватным инструментом для исследования динамики атмосферы над Байкалом, позволяя не просто фиксировать факт ветра, но и детально картировать его энергетическую структуру.

Сопоставление спутниковых снимков с данными реанализа ERA5 (Ranorly) позволило определить границы применимости глобальных моделей:

- Недооценка экстремальных скоростей: Установлено, что из-за сглаженного рельефа модели занижают скорость Сарминской бора в 1,5–2 раза. Там, где реанализ показывает 10–12 м/с, спутник и станции фиксируют порывы свыше 25 м/с.
- Искажение пространственной структуры: Модели «размывают» границы ветровых коридоров. Спутник Sentinel -1, в отличие от реанализа, четко визуализирует узкие струи и резкие переходы между штормовыми зонами и штилем.
- Отсутствие локальных эффектов: Реанализ практически не отображает прибрежные зоны ветровой тени и мезомасштабные завихрения, что делает его недостаточно надежным для навигационных прогнозов без спутниковой верификации.

Реанализ дает верный общий контекст, но существенно проигрывает радиолокации в количественной точности и детализации мезомасштабных процессов.

На основе детального дешифрирования снимков Sentinel -1 описаны уникальные мезомасштабные структуры, определяющие риски навигации в Малом Море:

- «Кинжальные» струи (факелы): Установлено, что Сарминская бора реализуется в виде узких (4–7 км) высокоскоростных потоков, выходящих из речных долин. Эти струи сохраняют разрушительную энергию на расстоянии до 20–30 км от берега, что невозможно зафиксировать стандартной метеосетью.
- Трансформация зон затишья: Выявлена зависимость «ветровых теней» от температуры воздуха. Доказано, что в предзимний период (ноябрь) зоны безопасности под защитой берега сужаются в 2–2,5 раза, так как плотный холодный воздух быстрее «обрушивается» на воду после хребта.

- Турбулентная структура: Текстуальный анализ выявил пульсирующий характер потока, проявляющийся в чередовании светлых и темных полос. Это подтверждает высокую турбулентность и волновой характер передачи импульса от атмосферы к водной поверхности.

Впервые на фактических данных показано, что зоны экстремального риска и зоны штиля могут находиться на расстоянии всего нескольких километров друг от друга, что делает спутниковые карты необходимым элементом навигационной безопасности.

Анализ данных аэрологического зондирования в сочетании с РСА - снимками позволил выявить ключевой фактор усиления ветра:

- Эффект «экранирования» потока: Установлено, что наличие температурной инверсии в нижней тропосфере (на высотах 1,5–2 км) играет роль жесткой «крышки» для воздушного потока. Инверсионный слой препятствует рассеиванию энергии вверх, заставляя всю массу холодного воздуха устремляться вниз по склонам Приморского хребта.
- Катализатор «кинжальных» ударов: Доказано, что именно при наличии низких задерживающих слоев формируются наиболее узкие и мощные струи ветра. Инверсия концентрирует импульс потока в тонком приводном слое, что приводит к резкому скачку скорости ветра непосредственно над акваторией Малого моря.
- Связь с реанализом: Использование Reanalysis позволило подтвердить, что в случаях наиболее разрушительной Сармы модель фиксирует резкое сближение изотерм на определенных высотах, что служит надежным прогностическим признаком начала экстремальной беды.

Температурная инверсия является необходимым термодинамическим условием для формирования «кинжального» эффекта, превращая обычный сток воздуха в разрушительный шторм.

В ходе исследования выявлены специфические ограничения радиолокационного метода, проявляющиеся при экстремальных температурных контрастах:

- Эффект «ложной шероховатости»: На примере кейса 03.11.2025 доказано, что при натекании холодного воздуха на теплую воду возникает интенсивное «парение» озера. Вызываемая им термическая конвекция создает на поверхности мелкую рябь, которую радар ошибочно принимает за штормовое волнение (15–18 м/с).
- Тектурные признаки «шума»: Установлено, что термический шум отличается от реального ветра своей структурой: он имеет диффузный, «зернистый» характер без выраженной линейной направленности (струйности), характерной для боры.
- Необходимость кросс -верификации: Подтверждено, что в предзимний период данные Sentinel -1 нельзя использовать изолированно. Для исключения ошибок требуется обязательное сопоставление с барическим полем (давлением) и температурным градиентом в Panoply. Отсутствие градиентов давления при высокой яркости снимка однозначно указывает на термическую природу сигнала.

Выявление границ применимости метода позволило разработать алгоритм фильтрации ложных сигналов, что существенно повышает достоверность мониторинга ветровых нагрузок в переходные сезоны.

Поставленная цель работы достигнута. Гибридный подход, объединяющий спутниковую радиолокацию и метеорологическое моделирование, позволил преодолеть «информационный вакуум» над акваторией Байкала и получить новые научные данные о механизмах трансформации воздушных потоков в условиях горного побережья.

Список используемых источников

1. Алексеева М. Н., Антохин П. Н. и др. Мезомасштабная структура ветровых полей над озером Байкал по данным численного моделирования // Оптика атмосферы и океана. - 2019. - Т. 32, № 9. - С. 734–741.
2. Арманд, Н. А. Дистанционное зондирование Земли в микроволновом диапазоне / Н. А. Арманд, А. И. Башаринов, А. М. Шутко // Радиотехника и электроника. - 1977. - Т. 22, № 11. - С. 2257–2284.
3. Асмус В. В., Кровотынцев В. А. и др. Спутниковый мониторинг состояния водных объектов и опасных гидрометеорологических явлений // Метеорология и гидрология. - 2017. - № 5. - С. 88–101
4. Белоусов С. И., Кравец Т. О. Использование данных спутниковой радиолокации для мониторинга ледяного покрова и ветрового волнения на крупных озерах // Исследование Земли из космоса. - 2018. - № 4. - С. 15–24.
5. Бухановский А. В., Лопатухин Л. И., Рожков В. А. Особенности полей ветра и волнения в прибрежных зонах глубоких водоемов // Труды Государственного океанографического института. - 2011. - Вып. 213. - С. 142–160.
6. Ветлов И.П. и Н.Ф. Вельтищева. Л. Руководство по использованию спутниковых данных в анализе и прогнозе погоды : Гидрометеоиздат, 1982.
7. Герман М.А. Космические методы исследования в метеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1985.
8. Гутман Л.Н., Франкль Ф.И. Гидродинамическая модель боры // ДАН, 1960. Т. 30. № 5.
9. Ипполитов И. И., Кабанов М. В. и др. Динамика климата региональных природных систем (на примере Байкальской природной территории). - Томск: Изд -во ИОА СО РАН, 2013. - 250 с.

10. Козлов И. Е., Кудрявцев В. Н. и др. Оценка скорости приводного ветра по радиолокационным изображениям Sentinel -1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - 2017. - Т. 14, № 3. - С. 183–196.
11. Ладейщиков Н. П. Особенности климата крупных озер (на примере оз. Байкал). - М.: Наука, 1982. - 138 с.
12. Митягина М. И., Лаврова О. Ю. Спутниковый радиолокационный мониторинг изменчивости динамических процессов в морской прибрежной зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - 2015. - Т. 12, № 3. - С. 176–191.
13. Трошкова И. А., Куимова Л. Н. Синоптические условия формирования сильных ветров на озере Байкал // Метеорология и гидрология. - 2012. - № 11. - С. 45–53.
14. Хромов С. П., Петросянц М. А. Метеорология и климатология: учебник. - М.: Изд -во МГУ, 2006. - 582 с
15. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. - 2020. - Vol. 146, No. 730. - P. 1999–2049.
16. Mouche A. A., Chapron B. Global view of ocean surface winds by Sentinel -1 SAR: Cost -efficient ocean monitoring // Remote Sensing of Environment. - 2015. - Vol. 164. - P. 255–267.
17. Torres R., Snoeij P., Geudtner D. et al. GMES Sentinel -1 mission: Team, design and performance // Remote Sensing of Environment. - 2012. - Vol. 120. - P. 9–24.
18. Copernicus Data Space Ecosystem - Официальный портал доступа к данным спутников Sentinel. [Электронный ресурс]. URL: <https://dataspace.copernicus.eu/> - Источник радиолокационных снимков Sentinel -1.

19. Copernicus Climate Data Store (CDS) - База данных климатического реанализа. [Электронный ресурс]. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/> - Источник глобальных полей ветра и давления ERA5.
20. NASA Goddard Institute for Space Studies (GISS) - Официальная страница программного обеспечения Panoply. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/>. - Инструмент для визуализации и анализа данных в форматах NetCDF и GRIB.
21. Flymeteo (Авиационная метеорология) - Информационный сервис визуализации прогностических данных и фактической погоды. [Электронный ресурс]. URL: <https://flymeteo.org/>. - Источник температурно-ветрового зондирования.
22. Расписание погоды (rp5.ru) - Архив метеорологических данных по станции Хужир. [Электронный ресурс]. URL: <https://rp5.ru/> - Источник фактических данных о скорости ветра и температуре.